



João Carlos Rodrigues **Desenvolvimento e automação de um sistema de**
Gomes Buér **encapsulamento de OLEDs**



João Carlos Rodrigues Gomes Buér **Desenvolvimento e automação de um sistema de encapsulamento de OLEDs**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Física, realizada sob a orientação científica do Doutor Luís Miguel Rino Cerveira da Silva, Professor Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro.

Ao meu avô.

.

o júri

presidente

Prof. Doutor João Filipe Calapez de Albuquerque Veloso
Professor auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

arguente

Prof. Doutor Carlos Augusto Xavier Ramos
Professor adjunto do Departamento de Física do Instituto Superior de Engenharia do Porto

orientador

Prof. Doutor Luis Miguel Rino Cerveira da Silva
Professor auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Ao meu orientador, Luis Rino, pelo apoio, disponibilidade, ajuda, conhecimento transmitido, interesse e amizade que demonstrou ao longo da execução do trabalho de mestrado e de quase todos os anos que passei na universidade. Muito obrigado.

Ao Sr. Ivo e Sr. Miguel da oficina de metalomecânica do DFUA que ajudaram a desenvolver e construir as peças do sistema. Sem a sua disponibilidade, a realização deste projeto seria muito dificultada

Ao Sr. Júlio que me proporcionou componentes eletrónicos e ajuda sempre que precisei.

Ao meu amigo Luis Gomes que ofereceu uma *webcam* para ser integrada no sistema.

Aos meus amigos mais chegados que me deram sempre apoio e confiança, e mostraram interesse no meu trabalho. À Bé, ao João Diogo, ao Ruben, ao Luis e ao Paulo, por diversas razões.

Aos meus pais que me deram a possibilidade de realizar este sonho de vida.

À minha namorada Silvana que esteve sempre comigo, apoiou, acreditou e me faz feliz todos os dias. Obrigado pela amizade e confiança que me suportaram nos momentos menos bons e me colocaram no caminho da felicidade e do sucesso.

Este trabalho foi realizado no âmbito dos projetos RECI/FISNAN/0183/2012 (FCOMP-01-0124-FEDER-027494)



palavras-chave

OLED, encapsulamento, degradação, sistema, automático

resumo

Díodos orgânicos emissores de luz (OLEDs) são dispositivos eletroluminescentes baseados em materiais orgânicos que inerentemente se degradam quando em funcionamento quando expostos às condições ambientais normais.

Este trabalho consistiu no desenvolvimento e construção de um protótipo de um sistema de encapsulamento automatizado para os OLEDs fabricados no Departamento de Física da Universidade de Aveiro (DFUA) com o objetivo de prolongar o seu tempo de vida para fins de investigação.

O principal constrangimento deste projeto foi a limitação de gastos imposta ao projeto. O sistema teria que ser construído utilizando ao máximo componentes existentes da reciclagem de equipamentos eletrónicos e informáticos fora de uso, da utilização de materiais reaproveitados e técnicas de construção de baixo custo. Outra das condições impostas foi a possibilidade de utilizar o sistema desenvolvido dentro de uma caixa de luvas com atmosfera de azoto, pelo que se pretendia que a operação do equipamento exigisse o mínimo envolvimento do operador.

Tendo em conta os fatores de degradação extrínsecos, o *design* dos OLEDs de uma forma geral e em particular dos construídos no DFUA, e os métodos de encapsulamento existentes no mercado e possíveis de implementar com os constrangimentos referidos, desenvolveu-se e construiu-se um protótipo em conformidade. Este sistema realiza o encapsulamento por colagem e vedação lateral, utilizando uma resina *epoxy* apropriada, de um vidro de proteção aplicado sobre o substrato, isolando as várias camadas de construção do OLED do meio ambiente. Todo o controlo do sistema de encapsulamento é feito remotamente num *software* desenvolvido para o efeito.

Com o sistema construído foram realizados vários ensaios para determinar os melhores parâmetros de funcionamento e otimizar as condições do encapsulamento.

O protótipo desenvolvido permite encapsular diversos formatos e dimensões de OLEDs com uma intervenção mínima do operador, possuindo a precisão de posicionamento necessária para a realização do encapsulamento nas condições pretendidas.

keywords

OLED, encapsulation, degradation, system, automatic

abstract

Organic light emitting diodes (OLEDs) are electroluminescent devices based on organic materials which inherently degrade when in operation when exposed to normal environmental conditions.

This work consisted on the development and construction of a prototype of an automated system for encapsulating OLEDs manufactured in the Department of Physics, University of Aveiro (DFUA) in order to prolong their operating lifetime for research purposes.

The main constraint of this project was the limitation imposed on the project budget. The system would have to be built maximizing the use of recycled electronic and computer out of use components and also using low cost construction techniques. Another condition was imposed on the possibility of using the system developed inside a glove box with nitrogen atmosphere, and it is intended that the operation of the equipment require minimal operator involvement.

Considering the extrinsic degradation factors; the design of OLEDs in general and the ones manufactured in DFUA, in particular; and the methods of encapsulation on the market that are possible to implement with the specified constraints, a prototype was developed and built accordingly. This system performs encapsulation by lateral sealing and bonding, using a suitable epoxy resin, of a protective glass applied on the substrate, insulating layers of the OLED construction from the environment. The control of the entire encapsulation system is done remotely with specific software developed in this project for this purpose.

With the system build, several tests were performed to determine the best operating parameters to optimize the conditions of encapsulation.

The prototype allows to encapsulate many different shapes and dimensions of OLEDs with minimal operator intervention, having the positioning accuracy required to achieve the desired conditions of encapsulation.

Índice

I. Lista de Abreviaturas

II. Lista de Figuras

III. Lista de Tabelas

1. Introdução.....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos.....	2
2. Revisão do estado da arte.....	3
2.1. Junção p-n	3
2.2. Geração de luz nos semicondutores inorgânicos.....	4
2.3. Geração de luz nos semicondutores orgânicos (OLED).....	4
2.4. Configuração de um OLED.....	5
2.5. Fabrico de OLEDs.....	7
2.6. Mecanismos de degradação	7
2.7. Métodos e equipamentos de encapsulamento	10
3. Desenvolvimento do protótipo.....	13
3.1. Fabrico dos OLEDs.....	13
3.2. Solução de encapsulamento	13
3.3. A resina de selagem.....	15
3.4. Componentes eletrónicos	16
3.4.1. A plataforma Arduino	16
3.4.2. Controlo de potência dos motores.....	18
3.4.3. Sensores de posição (Micro-interruptores).....	19
3.4.4. Relé	20
3.4.5. Termopar.....	21
3.4.6. Fotorresistência.....	21
3.4.7. Motores passo-a-passo.....	22
3.5. Sistema mecânico	23
3.5.1. Mesa XY.....	23
3.5.2. Sistema de deposição da resina	24
3.5.3. Sistema de colocação do vidro de encapsulamento e aquecimento	26
3.6. Sistema elétrico	26
3.6.1. Fonte de alimentação.....	27

3.6.2.	Controlo de potência dos motores (EasyDrivers).....	28
3.6.3.	Micro-interruptores	28
3.6.4.	Sistema de posicionamento do OLED	29
3.6.5.	Sistema de controlo de temperatura	30
3.6.6.	Sistema de sucção	31
3.6.7.	Sistema de controlo à distância (Router wireless)	31
3.7.	Tabela de custos	32
4.	Programação do sistema	33
4.1.	Arduino IDE.....	33
4.2.	Controlo e Interface de utilizador (Matlab).....	35
5.	Ensaio ao protótipo	38
5.1.	Processo de encapsulamento	38
5.2.	Testes de deposição de <i>epoxy</i>	39
5.2.1.	Procedimento de preparação de <i>epoxy</i>	40
5.2.2.	Testes de deposição de linhas de <i>epoxy</i>	41
5.3.	Testes de encapsulamento	43
5.4.	Testes de temperatura.....	45
6.	Conclusão e trabalho futuro	47
	Referências	49

I. Lista de Abreviaturas

OLED – Díodo Orgânico Emissor de Luz (*Organic Light Emitting Diode*)

LED – Díodo Emissor de Luz (*Light Emitting Diode*)

ITO – *Indium-Tin-Oxide*

Gap – Energia de banda proibida

HOMO – Nível de energia mais elevado ocupado (*Highest Occupied Molecular Orbital*)

LUMO – Nível de energia mais baixo desocupado (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital*)

EIL – Camada de Injeção de Eletrões (*Electron Injection Layer*)

ETL – Camada Transportadora de Eletrões (*Electron Transport Layer*)

EML – Camada Emissora (*Emission Layer*)

HIL – Camada de Injeção de Buracos (*Hole Injection Layer*)

HTL – Camada Transportadora de Buracos (*Hole Transport Layer*)

SMOLED - Díodo Orgânico Emissor de Luz de Pequena Molécula (*Small Molecule Organic Light Emitting Diode*)

R2R – Rotogravura (*Roll-to-Roll*)

ALD – Deposição em Camadas Atômicas (*Atomic Layer Deposition*)

LDR – Resistência Dependente de Luz (*Light Dependent Resistor*)

OPAMP – Amplificador Operacional (*Operational Amplifier*)

AWG – *American Wire Gauge*

GUI – Interface Gráfica do Utilizador (*Graphic User Interface*)

II. Lista de Figuras

Figura 1 – Evolução do mercado de encapsulamento de OLEDs entre 2012 e 2019. Prevê-se que atingirá \$850 milhões em 2019. [2].....	1
Figura 2 – Esquema de uma junção p-n.	3
Figura 3 – a) Esquema das ligações moleculares σ e π no caso do etileno. [5] b) Diagrama de níveis de energia nos semicondutores orgânicos.	5
Figura 4 – Esquema genérico da configuração de camadas de um OLED.	5
Figura 5 – Esquema dos níveis de energia HOMO e LUMO das camadas orgânicas numa configuração favorável à difusão de elétrons e buracos até à recombinação na camada emissora e emissão de radiação.	6
Figura 6 – a) Imagem obtida por microscopia ótica de um OLED em funcionamento a uma luminância de 100 cd/m ² . b) Imagem de SEM das bolhas formadas no cátodo de alumínio numa das áreas negras. [19].....	8
Figura 7 – a) Esquema do efeito do vapor de água na degradação do OLED. Verifica-se a formação de bolhas de H ₂ pela entrada de H ₂ O pelas perfurações no alumínio causadas pelo rebentamento das bolhas, causando a formação de pontos negros. b) Os pontos negros formam-se pela oxidação do cátodo, criando uma camada de óxido entre o eletrodo e a camada orgânica, o que leva a um aumento do volume e a deslaminção do eletrodo que cria novas formas de entrada de O ₂ , difundindo-se para as camadas orgânicas. [19]	9
Figura 8 - a) Encapsulamento de vidro em substrato rígido. b) Encapsulamento por filme fino em substrato flexível. [27]	10
Figura 9 - Esquema do processo de encapsulamento por multi-camada. [30].....	12
Figura 10 – a) OLED no estado original. A área assinalada com um círculo corresponde a uma das áreas ativas. b) e c) Deposição de <i>epoxy</i> através de pressão pelo êmbolo de uma seringa perto dos limites do substrato. d) e e) colocação do vidro de encapsulamento. f) Aquecimento da resina para causar o seu endurecimento.....	14
Figura 11 – Estrutura química do polímero <i>epoxy</i> . [32]	15
Figura 12 – a) Plataforma Arduino UNO. [36] b) Arduino Motor Shield compatível com o Arduino UNO. A alimentação e os terminais dos motores são ligados aos conectores com o parafuso.....	17
Figura 13 - a) EasyDriver v4.4. b) Big EasyDriver [40]	18
Figura 14 – Esquema das ligações entre o EasyDriver, o Arduino e um motor passo-a-passo. No Big EasyDriver fazem-se as ligações da mesma forma.	18
Figura 15 – a) Esquema de um corte transversal de um motor passo-a-passo. [44] b) Modelo de funcionamento de um motor bipolar. [45]	23
Figura 16 – a) Fotografia da mesa XY com identificação do torno de relojoeiro com um OLED colocado e b) identificação de alguns componentes.....	24
Figura 17 – a) Fotografia do atuador linear que empurra/puxa o êmbolo da seringa. b) Fotografia da peça extensora constituída pela mesa micrométrica e o suporte para as pontas volumétricas.....	25
Figura 18 - Fotografia do atuador linear que desce/sobe a ventosa e a resistência de aquecimento.....	26

Figura 19 – a) Painel de saída da caixa. b) Painel de entrada da caixa.....	27
Figura 20 - Ligações dos EasyDrivers ao Arduino.....	28
Figura 21 - Circuito esquemático dos micro-interruptores e ligação ao Arduino.....	29
Figura 22 – a) Esquema do sistema de posicionamento do OLED, o feixe do LASER reflete na pista de alumínio e incide na fotoresistência. b) Circuito esquemático do sistema de posicionamento.....	29
Figura 23 – Sistema de controlo da temperatura. O sinal elétrico do termopar é amplificado e medido no Arduino que vai controlar a ativação do relé, alimentando a resistência a 12 V....	30
Figura 24 – Circuito esquemático do controlo do relé que alimenta o motor DC da bomba....	31
Figura 25 – Fluxograma da programação dos casos no Arduino. a) Fluxograma relativo aos primeiros quatro casos (movimentação de motores). b) Encontra a posição do OLED. c) Ativação da resistência e controlo de temperatura. d) Regresso às posições iniciais. e) Ativa bomba de sucção. f) Desativa bomba de sucção. g) Corresponde aos últimos dois casos para deposição de <i>epoxy</i>	35
Figura 26 – Fluxogramas das funções e rotinas desenvolvidas em Matlab. a) funções que iniciam o Arduino no Matlab, com e sem fios. b) função de cálculo para motores, convertendo distância e velocidade para os parâmetros que o Arduino processa. c) função que envia comandos para o Arduino. d) rotina que executa “ <i>send2ard</i> ”.....	37
Figura 27 – a) Guia de encapsulamento de OLEDs. b) Imagem da <i>webcam</i> para visualização da altura da ponta em relação ao substrato.	37
Figura 28 – Estágio de deposição de <i>epoxy</i>	39
Figura 29 – Gráfico do número de gotas que caíram em função do tempo decorrido.	40
Figura 30 – Exemplo de um teste de deposição das quatro linhas de <i>epoxy</i> num substrato de vidro.....	41
Figura 31 – Resultados gráficos dos testes de deposição de linhas de <i>epoxy</i>	42
Figura 32 – Exemplo de um OLED bem encapsulado. a) visão global e b) detalhe do canto inferior esquerdo. A zona mais transparente indicada a vermelho corresponde á zona do OLED com <i>epoxy</i> de selagem.....	43
Figura 33 – Fotografias dos testes de encapsulamento a OLEDs para as condições referidas anteriormente. Nas figuras b) e d) estão assinaladas as zonas em que a <i>epoxy</i> não vedou totalmente o encapsulamento.	44
Figura 34 – Calibração do sistema de medição de temperatura. A reta de calibração tem equação $y=(3,776\pm0,029).10^{-2}x + (1,171\pm0,017)$ V, e uma correlação de 0,9996. A ponta do termopar do sistema está afastada da zona da <i>epoxy</i> medindo uma temperatura superior. Recalibrou-se a resposta do sistema para uma temperatura de 60 °C na zona da <i>epoxy</i> , medindo-se 3,9 V pelo sistema.	45
Figura 35 – Fotografia do sistema de encapsulamento de OLEDs.....	48

III. Lista de Tabelas

Tabela 1 – Propriedades físicas da <i>epoxy</i> EPO-TEK® 302-3M. [34]	16
Tabela 2 – Configuração do passo dos motores no EasyDriver [38]	19
Tabela 3 – Configuração do passo dos motores no Big EasyDriver. [39]	19
Tabela 4 – Tabela de custos de mercado (valores sem IVA) do material usado e custo efetivo para este protótipo devido à reutilização e reciclagem de materiais e equipamentos.	32
Tabela 5 – Parâmetros de deposição de <i>epoxy</i> para testes de encapsulamento.	44

1. Introdução

1.1 Motivação

O OLED, díodo emissor de luz baseado em semicondutores orgânicos, é um potencial substituto das formas de iluminação já existentes. Como alternativa às lâmpadas incandescentes já são utilizadas lâmpadas fluorescentes cujo consumo elétrico é mais reduzido e a eficiência é superior. E em alternativa a estas, já existe a iluminação LED que está a dar frutos e cujo consumo é ainda mais reduzido. É de importância extrema que a eficiência energética seja a melhor possível uma vez que a energia é produzida maioritariamente pela utilização de combustíveis fósseis que são cada vez mais escassos e cuja utilização é o principal responsável pela poluição ambiental no planeta. Por isso, é essencial investigar formas para redução do consumo de energia. Uma das soluções para este problema é o melhoramento e implementação dos OLEDs na iluminação e na utilização em ecrãs de grande área, desenvolvendo sistemas de produção de baixo custo que requeiram baixa exploração de recursos naturais. Comparando o OLED com o LED inorgânico, o LED é uma fonte pontual, de pequenas dimensões e rígido, enquanto o OLED pode ser implementado com áreas ativas de emissão grandes e ainda ser produzido em substrato flexíveis permitindo a colocação em diversas superfícies [1].

O crescimento do mercado de encapsulamento de OLEDs irá subir nos próximos anos segundo a NanoMarkets (figura 1), uma empresa de pesquisa de mercado e análise de indústria de materiais avançados, energia e eletrónica.

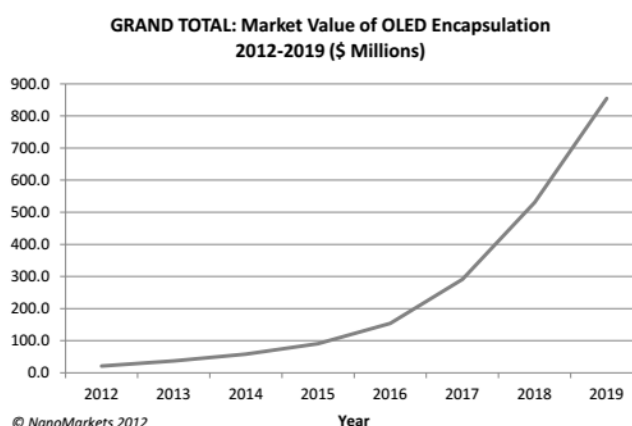


Figura 1 – Evolução do mercado de encapsulamento de OLEDs entre 2012 e 2019. Prevê-se que atingirá \$850 milhões em 2019. [2]

Este comportamento é esperado baseado no crescimento do mercado dos ecrãs de OLEDs e iluminação. O número de unidades de OLED irá ter um aumento significativo, serão mais usados para iluminação, aumentando a sua área emissiva, ou seja, a forma de iluminação deixam de ser pontual e passa a ser de grande área, e assim, a produção e venda de OLEDs com o respetivo encapsulamento vai aumentar nos próximos anos. [2]

Uma das principais limitações à produção e comercialização em grande escala de OLEDs é a sua rápida degradação quando submetido às condições ambientais, perdendo ao longo do tempo, eficiência e luminosidade. É necessário então o desenvolvimento de processos para proteger os OLEDs do ambiente, realizando um encapsulamento.

1.2 Objetivos

Este projeto consiste no desenvolvimento e implementação de um método para o encapsulamento dos OLEDs produzidos no Departamento de Física. Será construído um sistema de encapsulamento que será integrado numa câmara de ambiente controlado (vulgo camara de luvas) e o processo de encapsulamento será automatizado para poder ser controlado, maioritariamente, por fora da câmara. O encapsulamento será adaptado aos OLEDs produzidos em substratos rígidos com dimensões de 4x3 cm, no entanto o sistema desenvolvido permitirá encapsular OLEDs com outras dimensões.

À partida foi definido para este projeto que ele deveria ser realizado com o mínimo de custos possível, reaproveitando componentes eletrónicos existentes em material informático que já não funciona ou fora de uso e outros materiais, como sobras de outros projetos, que nunca foram utilizados mas que foram extremamente úteis para o desenvolvimento deste projeto, nomeadamente, para a construção do sistema mecânico. Foi essencial fazer então uma gestão do material existente permitindo um baixo investimento final. É importante referir que este sistema de encapsulamento serve apenas para fins de investigação num laboratório e não para utilização a nível industrial.

Para escolher os métodos adequados para o encapsulamento é importante perceber quais são os princípios de funcionamento, os agentes de degradação, os métodos de crescimento e de encapsulamento de OLEDs. Assim, no capítulo 2, é apresentada uma breve introdução sobre os semicondutores inorgânicos, fazendo um paralelismo com os semicondutores orgânicos, e a respetiva geração de luz. São explicados os métodos de fabrico genérico de OLEDs e os seus mecanismos de degradação. Por fim, são apresentados os métodos de encapsulamento para OLEDs rígidos e flexíveis que já existem.

O capítulo 3 mostra o desenvolvimento do protótipo do sistema de encapsulamento. Primeiro é explicado o fabrico dos OLEDs no Departamento de Física, para se poder escolher um método de encapsulamento e uma solução automática para o realizar. O protótipo do sistema mecânico e elétrico que foi construído está descrito neste capítulo, bem como uma explicação do funcionamento de alguns dos componentes eletrónicos utilizados e os circuitos utilizados no protótipo.

No capítulo 4 está explicada a programação que vai ser responsável pela automação do sistema e no capítulo 5 são apresentados os ensaios ao protótipo final construído, onde foram realizados testes de deposição de *epoxy* e de encapsulamento.

Conclui-se o trabalho no capítulo 6 e sugerem-se melhorias e continuação da investigação do encapsulamento de OLEDs.

2. Revisão do estado da arte

2.1. Junção p-n

A junção p-n é um contacto físico entre um semiconductor do tipo n e outro do tipo p. Os semicondutores de tipo n são os que são dopados de impurezas dadoras de carga, e os de tipo p os que são dopados com impurezas aceitadoras de carga, como se pode visualizar na figura 2. Ao unir os dois tipos de semiconductor formam-se três zonas com diferentes propriedades: a de tipo n, região em que os portadores de carga são eletrões (carga negativa), a de tipo p em que os portadores são lacunas (carga positiva) e a zona de depleção, região onde há a difusão de eletrões da parte n para a parte p, criando um campo elétrico. Este campo opõe-se à difusão de portadores e gera uma nova corrente, e assim, eletrões aproximam-se da zona p e lacunas da zona n. Quando é restituído o equilíbrio as correntes de difusão de ambos os portadores anulam-se.

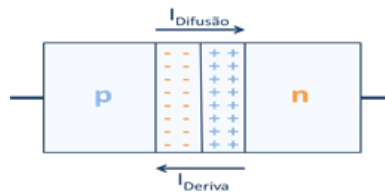


Figura 2 - Esquema de uma junção p-n.

$$V_0 = V_t \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad \text{Eq. 1}$$

Esta junção em circuito aberto, ou seja, sem aplicação de campos externos, possui uma barreira de potencial V_0 que é dada pela expressão da equação 1, onde V_t é a constante térmica, dada por $V_t = \frac{K_B T}{q}$, em que K_B é a constante de Boltzman, T a temperatura, q a carga do eletrão, N_A a concentração de aceitadores, N_D a concentração de dadores e n_i a concentração intrínseca de portadores.

A aplicação de uma tensão aos terminais da junção leva a uma alteração no comportamento elétrico do dispositivo. A polarização direta, ou seja, quando colocada uma tensão superior na região p do que na região n, provoca uma diminuição da zona de depleção, e consequentemente, uma diminuição da barreira de potencial, que leva a uma maior mobilidade dos portadores de carga, através da barreira, aumentando assim a corrente de condução. A polarização inversa, que resulta quando colocada uma tensão maior na região n do que na região p, leva a um aumento da barreira de potencial, dificultando a mobilidade dos portadores de carga, o que leva a termos aproximadamente um circuito aberto. Este é o princípio de funcionamento dos díodos. [3]

2.2. Geração de luz nos semicondutores inorgânicos

A emissão de luz ocorre quando um LED de junção p-n é polarizado diretamente. A condução é feita por portadores minoritários e desta forma a probabilidade de recombinação é elevada. Ao haver recombinação é libertado um fóton com energia igual à diferença de energia entre a banda de condução e a banda de valência. Obtém-se assim emissão de luz que não é monocromática mas que apresenta uma largura espectral relativamente estreita. Este é o princípio de funcionamento dos LEDs (*Light Emitting Diode*). A emissão nos LEDs é do tipo espontânea e a direção da emissão é aleatória. [4]

2.3. Geração de luz nos semicondutores orgânicos (OLED)

Os semicondutores orgânicos possuem na sua constituição átomos de carbono que são estruturados com ligações alternadamente simples e duplas. [5] A configuração eletrônica fundamental do átomo de carbono é $1s^2 2s^2 2p^2$. Nesta configuração apenas dois elétrons p podem formar ligações com outros átomos. No entanto as ligações entre átomos são descritas pela hibridização de orbitais. A hibridização de diferentes orbitais atômicas leva a uma maior estabilidade molecular. As hibridizações possíveis são sp^3 , sp^2 e sp . Para os semicondutores orgânicos a hibridização sp^2 é a mais importante. Neste caso a orbital 2s e duas das três orbitais 2p vão-se combinar e formar três orbitais híbridas sp^2 (figura 3a). Estas três orbitais são coplanares e vão formar três ligações covalentes σ com átomos vizinhos que estão fortemente localizados. A orbital 2p, que não é usada na hibridização está posicionada perpendicularmente ao plano formado pelas sp^2 . Se duas orbitais 2p de átomos vizinhos se sobrepuserem, uma ligação tipo π é formada. A região de sobreposição de orbitais está localizada acima e abaixo do plano formado pelas ligações σ . A combinação de ligações σ e π entre dois átomos de carbono forma uma ligação dupla. Se o número de ligações sp^2 híbridas de átomos de carbono for aumentado, são formadas ligações alternadamente simples e duplas. Nestes sistemas conjugados, idealmente, as ligações π estendem-se a toda a molécula e uma nuvem de elétrons deslocalizados é criada, sendo partilhados pelos átomos da molécula conjugada e movendo-se livremente pela molécula. Isto confere propriedades semicondutoras. A sobreposição de orbitais vai formar novas orbitais, ou seja, vão-se desdobrar. A energia destas novas orbitais relativamente às originais depende da energia e da sobreposição das orbitais originais, quanto mais forte for a sobreposição, maior é o desdobramento. Desta forma, gera-se uma orbital π ligante e uma orbital π^* antiligante. A orbital π vai estar ocupada no estado fundamental e a π^* desocupada, como se pode ver na figura 3b. [6] O nível de energia mais elevado que se encontra preenchido é designado de HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*) e o nível de mais baixa energia desocupado é designado de LUMO (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital*). Existe então um gap entre estas duas bandas de energia com valores típicos de 1,5 eV a 3 eV. Nos OLEDs, requer-se que haja recombinação de um elétron do estado HOMO para o LUMO libertando um fóton com energia igual à diferença de energia entre os dois níveis. [5]

Orbitais moleculares das moléculas conjugadas, quando estas se encontram muito próximas como no caso de filmes finos, vão interagir e sobrepor-se. Assim, as orbitais moleculares originais desdobram-se novamente e formam orbitais intermoleculares. A sobreposição neste caso é mais fraca que entre átomos de uma molécula única pois as

distâncias são mais elevadas logo as interações são mais fracas. Assim, o desdobramento e a deslocalização molecular é menor e os elétrons tendem a estar mais localizados e o transporte de carga fica limitado ao transporte de uma molécula para a outra. Isto indica que para obter eficiências de transporte elevadas, a sobreposição intermolecular tem que ser otimizada. [6]

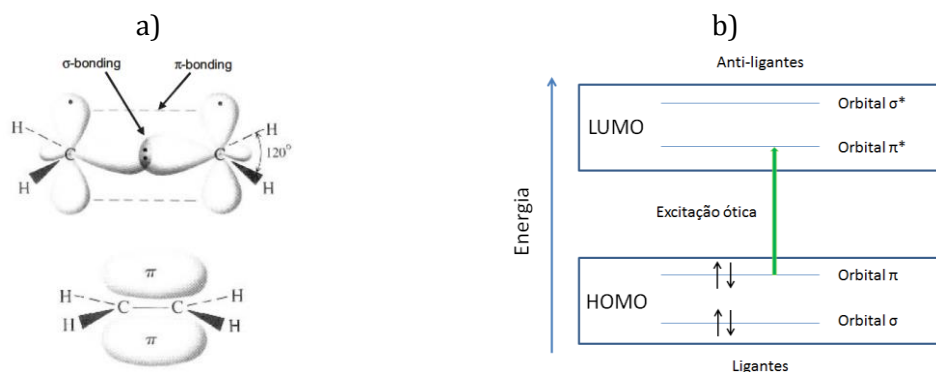


Figura 3 – a) Esquema das ligações moleculares σ e π no caso do etileno. [5] b) Diagrama de níveis de energia nos semicondutores orgânicos.

2.4. Configuração de um OLED

Um OLED consiste numa sequência de camadas de filmes finos de materiais orgânicos entre os elétrodos, um ânodo para injeção de buracos e um cátodo para injeção de elétrons. Genericamente, as camadas constituintes de um OLED típico estão representadas na figura 4.

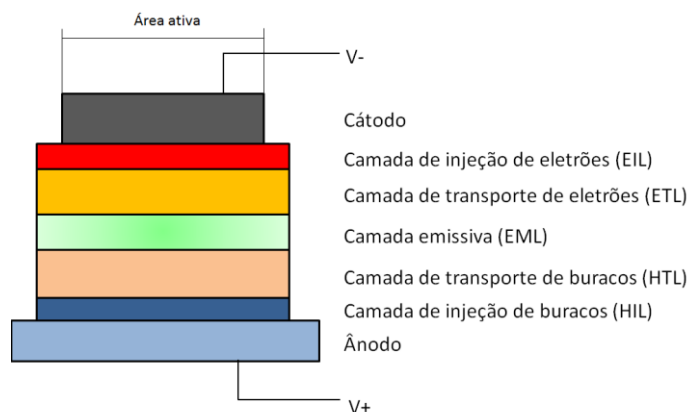


Figura 4 – Esquema genérico da configuração de camadas de um OLED.

Quando o dispositivo é polarizado diretamente, os buracos são injetados desde o ânodo e os elétrons desde o cátodo. Os portadores de carga movem-se através das camadas de transporte num mecanismo de *hopping*, e encontram-se na camada de emissão onde se formam os excitões (pares elétron-buraco) que apresentam uma probabilidade de decair radiativamente, dando origem à eletroluminescência dos estados orgânicos.

Para alcançar uma eficiência elevada, ou seja, aumentar a relação entre fótons emitidos e os elétrons injetados, as camadas devem cumprir determinados requisitos. A camada de injeção de buracos (HIL) tem que facilitar a injeção de buracos desde o ânodo até à

camada de transporte de buracos (HTL). Isto pode-se conseguir escolhendo o nível energético HOMO, para que este esteja entre o HOMO da HTL e o potencial de ionização do ânodo. Os níveis HOMO e LUMO tratam-se de forma análoga à banda de valência e de condução nos semicondutores inorgânicos. A HTL deve ter elevada mobilidade de buracos e deve impedir que os elétrons do cátodo cheguem ao ânodo. A transmissão das camadas orgânicas deve ser elevada para a gama de comprimentos de onda de emissão do dispositivo. As posições HOMO e LUMO da camada de emissão (EML) devem possibilitar a injeção de buracos e elétrons desde as camadas vizinhas. As propriedades das camadas de injeção e transporte de elétrons (EIL e ETL) seriam complementares às HIL e HTL, com níveis LUMO adequados para alta mobilidade de elétrons e analogamente à HTL, deve impedir que os buracos cheguem ao cátodo. [7, 8] O ânodo deve ter um potencial de ionização elevado para injetar buracos no nível HOMO da HIL, e o cátodo deve ser um metal com uma função trabalho baixa (alumínio por exemplo). Desta forma a barreira de potencial cátodo-ETL e ânodo-HTL diminui, assegurando uma injeção de carga abundante [9, 10]. Por fim, um dos elétrodos tem que ser transparente para se conseguir a extração de luz para o exterior do dispositivo. Por esta razão utiliza-se habitualmente o ITO (*Indium Tin Oxide*) como ânodo transparente.

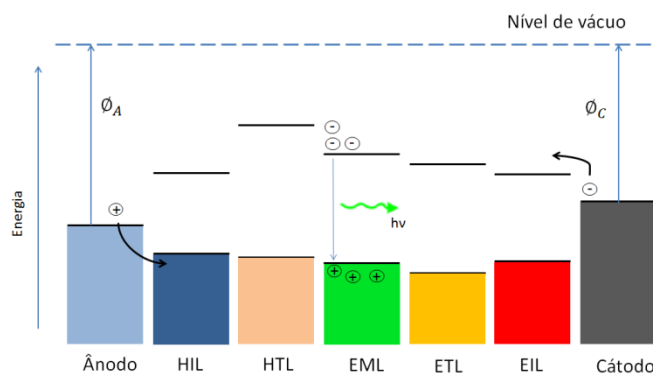


Figura 5 - Esquema dos níveis de energia HOMO e LUMO das camadas orgânicas numa configuração favorável à difusão de elétrons e buracos até à recombinação na camada emissora e emissão de radiação.

Esta estrutura relativamente complicada pode em vários casos ser substituída por outra com menos camadas do que as da figura 5. Isto deve-se à utilização de materiais orgânicos que reúnem várias das propriedades mencionadas anteriormente numa só camada. Um mesmo material pode servir como camada injetora e transportadora do mesmo portador.

Na camada emissora, ocorre a recombinação do excitão e é libertado um fóton com uma energia que corresponde à diferença de energia entre o nível HOMO e o nível LUMO desta camada.

As alturas das barreiras de injeção de portadores nas distintas interfaces e as respetivas mobilidades determinam a posição da zona de recombinação e o rendimento do dispositivo, afetando as tensões de funcionamento e a eficiência da luminescência. A interação entre o elétrodo e a camada orgânica também influencia as propriedades eletrónicas da interface, que por sua vez determinam as propriedades do OLED. [8]

2.5. Fabrico de OLEDs

Existem diversos processos para o fabrico de OLEDs, dependendo se estes são de molécula pequena (SMOLED - *Small Molecule Organic Light Emitting Diode*) ou baseados em polímeros. Nos SMOLED as camadas orgânicas são depositadas no substrato na fase de vapor, formando o filme fino de material orgânico. A deposição nesta forma deve ser realizada em alto vácuo se queremos um controlo de pureza do material depositado e que este não reaja com o oxigénio proveniente da atmosfera. [8] Uma das técnicas preferenciais para o crescimento de filmes orgânicos finos é a evaporação térmica resistiva, em que um filamento metálico é alimentado eletricamente, aquecendo até que o material orgânico evapora e condensa nas paredes do substrato [11]. No caso dos OLEDs baseados em polímeros as camadas orgânicas são depositadas em fase líquida. Alguns dos métodos de deposição que permitem o crescimento de filmes finos das camadas orgânicas são: o revestimento por rotação de substrato (*spincoating*) que consiste em gotear a solução sobre o substrato e submete-lo a uma rotação controlada obtendo um revestimento fino e homogéneo da camada orgânica [12]; sistemas de deposição baseados na impressão por jato de tinta (*inkjet*), tal como nas vulgares impressoras que temos em casa, em que a fase líquida é depositada gota a gota, permitindo um controlo de posição de crescimento mais bem definido [13]; e a rotogravura (*Roll-to-Roll, R2R*). Os métodos de *inkjet* e *R2R* são mais usados para fabricar OLEDs em substratos flexíveis e não em rígido.

Para criar o ânodo, é crescido um óxido condutor transparente no substrato, normalmente ITO, e para o fabrico do cátodo utiliza-se um metal, normalmente alumínio, crescido por um método de deposição por vapor. [8]

2.6. Mecanismos de degradação

Atualmente o maior desafio á utilização de OLEDs em iluminação e ecrãs de grande área é a degradação dos materiais orgânicos que os constituem, tornando-se necessário protege-los das condições ambientais. A degradação é atribuída a vários mecanismos, como a cristalização dos sólidos orgânicos [14, 15], reações eletroquímicas na interface elétrodo-material orgânico [16] e migração de espécies iónicas [17].

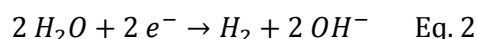
Os mecanismos de degradação nos OLEDs podem ser categorizados em extrínsecos e intrínsecos, dependendo se a degradação é devida a estímulos externos ou internos, respetivamente. O vapor de água (H_2O) e o oxigénio estão identificados como as principais fontes extrínsecas existentes na atmosfera para a degradação dos OLEDs. Para evitar esta degradação o encapsulamento do dispositivo é essencial.

A água é muito mais destrutiva que o oxigénio. Os efeitos do O_2 causarão a oxidação de metais e materiais orgânicos enquanto o H_2O desencadeará uma reação eletroquímica que causa a deslaminção dos elétrodos. A oxidação e a deslaminção do cátodo são largamente responsáveis pelo aparecimento e crescimento de pontos não emissivos na área emissiva do dispositivo. Para definir os meios para um encapsulamento adequado é importante saber de que forma o ambiente atmosférico atua na degradação do dispositivo. Os filmes finos de alumínio representam uma boa barreira a oxigénio e água sendo também uma escolha

económica para o cátodo do dispositivo. [18] Ainda assim, estes filmes não previnem os pontos negros que se formam num ambiente atmosférico normal. Quando os OLEDs estão em vácuo, a uma pressão abaixo dos 10^{-5} mbar, o crescimento de pontos negros é inexistente, não se verificando degradação aparente. O mesmo resultado é observado quando os dispositivos são expostos a uma atmosfera de argon puro ou de azoto puro, o que significa que a atmosfera de azoto dentro duma câmara de luvas é adequada para o fabrico e encapsulamento de OLEDs. [19]

Efeito do vapor de água

Um estudo [19] mostrou que à temperatura ambiente e humidade relativa de 75%, com tensão aplicada ao dispositivo, a degradação é muito rápida, levando à destruição do dispositivo em poucas horas. Observa-se o aparecimento de pontos negros na superfície emissora e nos limites do filme de alumínio, com a consequente diminuição da corrente de condução, o que significa que a injeção de carga para as camadas orgânicas é cada vez mais reduzida. A adesão do alumínio ao substrato também se torna mais fraca depois da degradação, o que sugere que ocorreu a deslaminacão do cátodo, e assim, a injeção de corrente nas camadas orgânicas diminui. O crescimento dos pontos negros é interrompido quando a corrente de alimentação é desligada, o que significa que a degradação é devida a processos eletroquímicos. A redução eletroquímica da água que leva à produção de hidrogénio é a seguinte:



O facto de o hidrogénio se formar debaixo do cátodo de alumínio gera a deslaminacão do eléctrodo. Como mostram as figura 6 e 7a a formação de pontos negros altera a morfologia da superfície do cátodo. Conseguem-se observar formas semelhantes a bolhas, formadas pelo gás originado pelo processo eletroquímico.

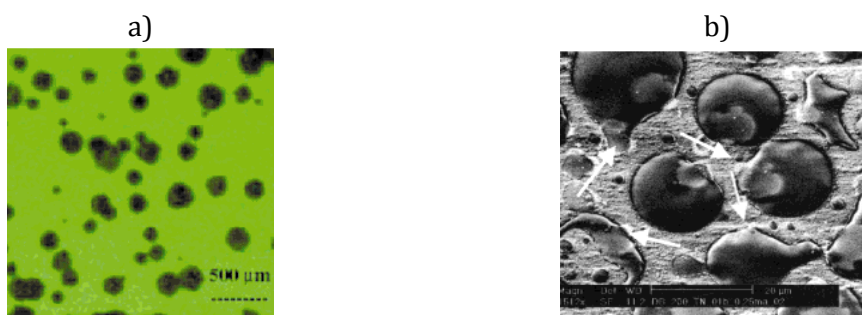


Figura 6 – a) Imagem obtida por microscopia ótica de um OLED em funcionamento a uma luminância de 100 cd/m^2 . b) Imagem de SEM das bolhas formadas no cátodo de alumínio numa das áreas negras. [19]

Em conclusão, o vapor de água é responsável pelo rápido aumento de pontos negros no dispositivo diminuindo a área emissora. O vapor penetra no filme de alumínio através dos seus limites e micro buracos à superfície (*pinholes*). Quando alimentado, na interface cátodo-material orgânico gera-se uma reação eletroquímica, originando hidrogénio, cuja pressão por baixo do filme é responsável pelo aparecimento de bolhas que provocam a sua perfuração a certo ponto. E desta forma, uma nova forma de entrada de vapor de água é adicionada. [19]

Efeito do oxigénio

O crescimento de pontos negros também é observado com a presença de oxigénio mas a velocidade de crescimento é muito menor do que no caso do vapor de água (mais do que três ordens de grandeza). Observa-se que a morfologia dos pontos negros é diferente dos causados pela água, com e sem tensão aplicada, verificando-se o aparecimento de pontos negros na superfície emissiva e nos limites do cátodo. A forma dos pontos é perfeitamente circular e crescem linearmente com o tempo. O efeito da temperatura também é observável, o aumento da temperatura acelera o crescimento dos pontos negros. O oxigénio também causará a deslaminção do elétrodo (figura 7b) através da sua oxidação, facilitando ainda mais a entrada de oxigénio com a consequente oxidação do material orgânico na zona emissora e nos limites do cátodo, o que leva a uma recristalização ou a uma reorientação das moléculas alteradas quimicamente, alterando a morfologia do material orgânico. [19]

Com o efeito do vapor de água e do oxigénio é impossível manter um OLED em funcionamento contínuo durante muito tempo, degradando-se rapidamente. Devido à deslaminção, o cátodo não permite a injeção de corrente no dispositivo, e a oxidação leva a uma diminuição da eficiência de luminescência do material orgânico. [19]

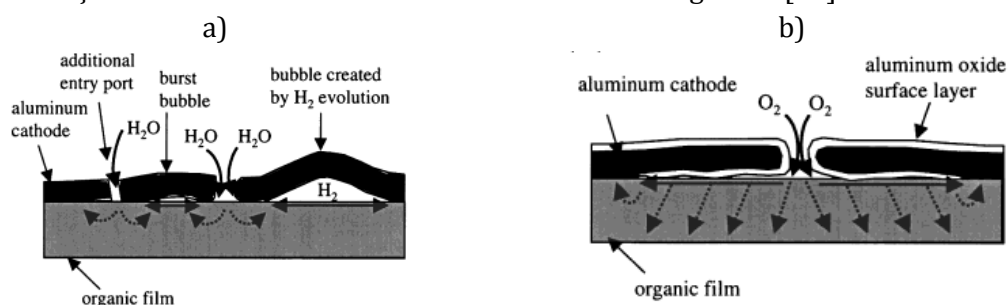


Figura 7 – a) Esquema do efeito do vapor de água na degradação do OLED. Verifica-se a formação de bolhas de H₂ pela entrada de H₂O pelas perfurações no alumínio causadas pelo rebentamento das bolhas, causando a formação de pontos negros. b) Os pontos negros formam-se pela oxidação do cátodo, criando uma camada de óxido entre o elétrodo e a camada orgânica, o que leva a um aumento do volume e a deslaminção do elétrodo que cria novas formas de entrada de O₂, difundindo-se para as camadas orgânicas. [19]

Os fatores de degradação extrínsecos são os que provocam a destruição do dispositivo em pouco tempo. Mas os fatores intrínsecos também representam um mecanismo de degradação destes dispositivos, que já não são possíveis de eliminar através do encapsulamento. A formação de estados excitados é intrínseca à operação dos OLEDs. Pode ocorrer irreversibilidade química dos estados excitados que removem as espécies emissivas do dispositivo. Esta reação pode envolver os elementos das camadas orgânicas adjacentes. [20, 21]

A cristalização dos materiais orgânicos é outro fator de degradação das camadas orgânicas devido à baixa temperatura de transição vítrea desses materiais, que é atingida através do calor gerado por efeito de Joule quando o OLED está em funcionamento. Por outro lado, os materiais orgânicos ficam mais macios e frágeis, ou seja, apresentam ligações moleculares mais fracas acima da temperatura vítrea, e assim, o movimento dos iões através das várias camadas que constituem o OLED é facilitado. [21] Estes iões móveis que penetram nas camadas através dos elétrodos ou contaminações durante a construção do dispositivo

alteram o campo efetivo aplicado ao dispositivo e o funcionamento do díodo. [22, 23] Este mecanismo de degradação é atribuído maioritariamente à instabilidade morfológica da camada HTL causada pela elevada mobilidade molecular que pode levar a mudanças morfológicas atingindo formas mais estáveis mas prejudiciais ao funcionamento do dispositivo. Esta mudança morfológica leva à degradação pois causa deslaminção entre as camadas orgânicas, o que interrompe a condução elétrica e gera recombinações não radiativas. [24]

Parte da solução está na utilização de materiais com temperatura de transição vítrea mais elevada, particularmente na camada HTL, aumentando a resistência do dispositivo à temperatura de funcionamento e não afetando o seu rendimento. Também é possível aumentar o tempo de vida dos OLEDs dopando os materiais por forma a prevenir a cristalização. [25]

Um outro mecanismo de degradação intrínseco resulta da instabilidade na interface ITO/HTL, onde se formam armadilhas para os portadores de carga, o que leva a uma acumulação de cargas positivas na HTL, perto do contacto com o ITO. A fraca adesão da camada HTL ao ITO também representa uma forma de degradação, que pode ser eliminada pela introdução de uma camada intermédia (o chamado *buffer*) entre o ITO e a HTL. [24]

2.7. Métodos e equipamentos de encapsulamento

Tendo em conta os fatores de degradação externos que causam a destruição do dispositivo em pouco tempo, é imperativo que a fabricação dos OLEDs, assim como o processo de encapsulamento, sejam realizados em ambiente controlado, nomeadamente atmosfera de azoto puro ou em vácuo, consoante o processo. O encapsulamento deve ser capaz de impedir a entrada de vapor de água e oxigénio quando o dispositivo entra em contacto com a atmosfera ambiente.

Um dos principais métodos de encapsulamento utilizados em OLEDs rígidos para iluminação é a cobertura com um encapsulamento de vidro que tem provado ser eficiente para dispositivos em substratos rígidos. Basicamente, o encapsulamento de vidro é colado ao substrato do OLED e vedado devidamente (figura 8a) para que não seja possível a entrada de agentes de degradação provenientes da atmosfera. O encapsulamento pode ter um dissecante associado para absorver gases no caso de um encapsulamento em vácuo. [26]

No caso dos OLEDs flexíveis o método de encapsulamento é feito por barreiras de filmes finos, como mostra a figura 8b.

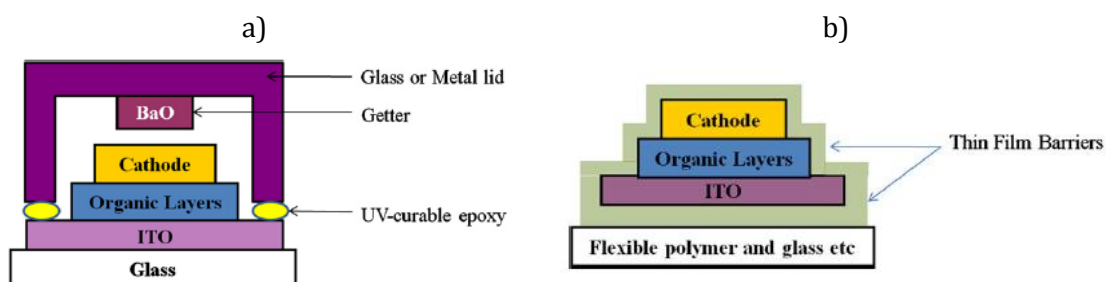


Figura 8 - a) Encapsulamento de vidro em substrato rígido. b) Encapsulamento por filme fino em substrato flexível. [27]

A Canon desenvolveu um equipamento de produção e encapsulamento em massa de OLEDs em substratos rígidos de vidro. Este sistema é baseado na tecnologia de automação, robótica e precisão. Um controle preciso dos mecanismos de alinhamento é fundamental para a produção de pixels de OLEDs, e o seu encapsulamento. Na fase da realização do encapsulamento, um vidro com um dissecante e um adesivo é transportado para uma câmara de ambiente controlado, com uma atmosfera de azoto, mantida a uma baixa temperatura, onde vai ser pressionado contra o substrato, seguido da adesão e encapsulamento pela cura do adesivo por radiação ultravioleta. Quando o processo de encapsulamento terminar, o dispositivo é levado para um *stock* de armazenamento pelo robot instalado fora da câmara para completar o processo. Todo este processo é realizado por mecanismos automáticos. O alinhamento entre o substrato e o encapsulamento possui uma precisão de 50 μm . [28]

Os equipamentos para encapsulamento para substratos rígidos possuem geralmente todos o mesmo princípio em que um alinhamento automático e preciso é fundamental. O método de encapsulamento preferido para este trabalho é então realizar a cobertura com um encapsulamento de vidro baseado no mesmo princípio que o equipamento da Canon. No entanto, este sistema será muito mais simples pois o objetivo passa pela investigação das propriedades dos OLEDs desenvolvidos para investigação no Departamento de Física e não produzir um sistema de encapsulamentos em massa. Apesar de mais simples, o sistema terá uma precisão de alinhamento suficiente para realizar um bom encapsulamento, equivalente aos sistemas comerciais (50 μm).

Os OLEDs flexíveis são maioritariamente fabricados usando o método *R2R*, desta forma, seria ideal que se desenvolvesse uma barreira aos agentes de degradação compatível com este método de crescimento.

O processo *R2R* abrange uma gama de processos em que um substrato é transferido entre dois rolos que se deslocam e durante o qual são aplicados processos ao substrato. Este processo permite a utilização de substratos flexíveis, geralmente de plástico ou materiais poliméricos, e também em vidros finos, metais e materiais cerâmicos. Existem processos de adição e subtração no substrato, incluindo métodos de vácuo, térmicos e de solução. A vantagem inerente a este processo é a utilização de métodos baseados em soluções, que permite uma elevada taxa de reprodutibilidade e baixo custo. [29]

Uma forma de encapsular OLEDs flexíveis é a utilização de uma barreira de múltiplas camadas. Normalmente utiliza-se uma sequência de camadas polímero-óxido metálico, como mostra a figura 9. A parte orgânica e a parte inorgânica da barreira têm diferentes funções. O polímero é responsável pela propriedade planar do encapsulamento e o óxido metálico pela barreira a agentes externos, impedindo a entrada de oxigénio e vapor de água.

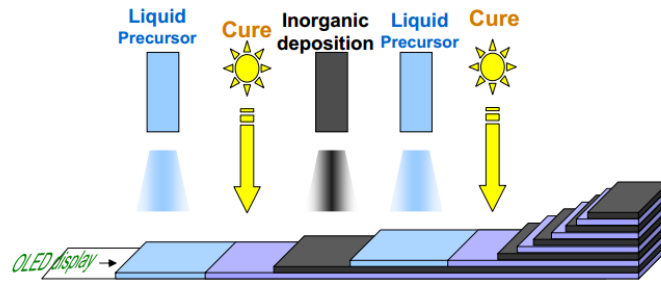


Figura 9 - Esquema do processo de encapsulamento por multi-camada. [30]

Este método de encapsulamento possui diversas vantagens: é um processo que não necessita de altas temperaturas (o que degradaria o OLED); é um excelente encapsulamento para substratos flexíveis que não são perfeitamente planos e apresentam defeitos, e além disso são muito permeáveis ao oxigênio e vapor de água, oferecendo pouca proteção aos componentes eletrônicos; são encapsulamentos transparentes que permitem uma eficiência de extração de luz elevada; são finos, leves e inquebráveis; desenvolvidos a partir de materiais de baixo custo; este método de encapsulamento pode ser integrado em sistemas de produção de grande área como o *R2R* e outras técnicas de impressão. [30]

O desenvolvimento de um mecanismo de deposição de camadas atômicas (ALD – *Atomic Layer Deposition*) compatível com um sistema de *R2R* seria uma mais-valia para o crescimento de dispositivos eletrônicos e a realização do seu encapsulamento. O ALD é uma técnica de deposição de filmes finos em que os filmes são crescidos por uma sequência de precursores químicos que são depositados na superfície de um substrato. A reação dos precursores no substrato leva ao crescimento do filme camada-a-camada, permitindo controlar a espessura do filme com o número de ciclos de processos. Este processo permite a criação de filmes extremamente uniformes e sem *pinholes* [31]. Por ALD é possível depositar filmes de óxidos metálicos a temperaturas relativamente baixas. Assim, o ALD é promissor à indústria de semicondutores e pode ser adaptado a processos de grande área para filmes orgânicos onde o óxido metálico possui uma elevada eficiência de barreira a agentes externos e propriedades dielétricas, nomeadamente, óxidos de alumínio.

3. Desenvolvimento do protótipo

Neste capítulo está descrito o desenvolvimento do protótipo para o sistema de encapsulamento de OLEDs. Tendo em conta os métodos de encapsulamento existentes optou-se pelo princípio daquele que é mais utilizado para substratos rígidos, e além disso, é dos sistemas mais eficazes e simples de construir.

3.1. Fabrico dos OLEDs

Para encontrar soluções de encapsulamento para os OLEDs é importante conhecer o método de fabrico dos dispositivos utilizados no Departamento de Física.

Os OLEDs são crescidos num substrato de vidro com dimensões de 4x3 cm. O sistema de encapsulamento estará preparado para encapsular OLEDs com estas dimensões. Para encapsulamento de outras dimensões que eventualmente se fabriquem, será necessário alterar algumas sequências de processos na programação e, eventualmente, a posição de algumas peças. Em cada substrato são criados quatro OLEDs com uma área de 5x5 mm de emissão, cada uma (figura 10a) correspondente à interceção das faixas de ITO e alumínio.

O substrato de vidro contém ITO previamente depositado por toda a área. Para criar o ânodo, é necessário formar as pistas de ITO, decapando-o onde não se pretende, utilizando-se máscaras para o efeito. A decapagem é feita quimicamente, utilizando ácido clorídrico (HCl). De seguida, faz-se a deposição das camadas orgânicas que serão escolhidas de acordo com as características que se pretende obter, nomeadamente a cor e o brilho do OLED. O método de deposição também pode variar. Por último realiza-se a deposição do alumínio.

3.2. Solução de encapsulamento

O sistema elétrico e mecânico para o encapsulamento de OLEDs foi definido de acordo com o método pretendido: a fixação de uma barreira de vidro ao substrato. O procedimento de encapsulamento passa pelos vários estágios descritos abaixo e na figura 10(b-f) e deverá ser compatível com a sua realização numa câmara de luvas, numa atmosfera de nitrogénio.

1. Deposição duma resina *epoxy* junto aos limites do substrato do OLED;
2. Cobertura do OLED com um encapsulamento de vidro, com ou sem um espaçador, colocado sobre a *epoxy* já depositada, deixando espaço para fixar os contactos elétricos;
3. Pré aquecimento para endurecer a *epoxy*;
4. Fim do processo de encapsulamento e extração do OLED.

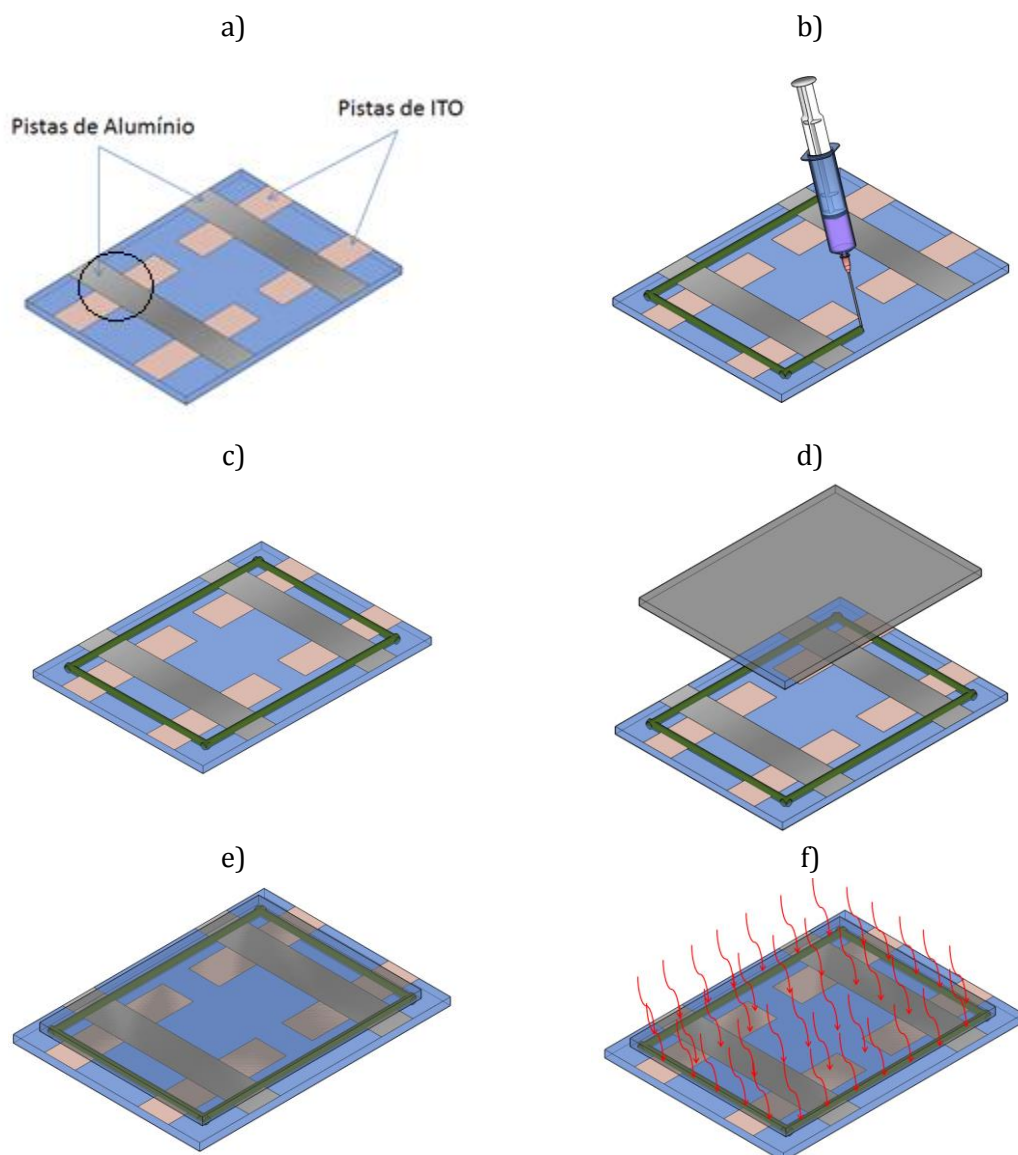


Figura 10 - a) OLED no estado original. A área assinalada com um círculo corresponde a uma das áreas ativas. b) e c) Deposição de *epoxy* através de pressão pelo êmbolo de uma seringa perto dos limites do substrato. d) e e) colocação do vidro de encapsulamento. f) Aquecimento da resina para causar o seu endurecimento.

Sendo esta a solução final escolhida, foi definido o sistema mecânico constituído por uma mesa XY, para a movimentação do OLED pelos diferentes estágios, e dois atuadores lineares: um deles regula o movimento de um êmbolo de uma seringa que vai controlar a deposição de *epoxy* através da pressão exercida; o outro atuador serve para colocar o vidro de encapsulamento e efetuar o pré-aquecimento da resina. O vidro de encapsulamento é retirado de um depósito e colocado sob pressão sobre o OLED. Para o transportar utiliza-se um sistema de sucção constituído por uma pequena bomba de fluidos e uma ventosa, assim o vidro está seguro na ventosa e é transportado sem cair.

Através de um sistema elétrico, faz-se o controlo automático do sistema mecânico. Um microprocessador irá controlar diversos sensores de posicionamento e temperatura, e os controladores de potência dos motores que irão induzir os movimentos.

Tendo em conta que o sistema tem que funcionar dentro da câmara de luvas, tomaram-se algumas decisões de *design* e fizeram-se algumas adaptações que permitam o seu correto funcionamento. Estabelecer ligações por cabos elétricos de fora para dentro da câmara, tanto para alimentar o sistema como para o controlar, envolve a colocação de vários passadores e conectores elétricos na própria câmara, solução complicada e dispendiosa. Assim foi adotada uma solução que permitisse colocar todo sistema de alimentação elétrica e controlo juntamente com o sistema mecânico dentro da câmara. Assim, a fonte de alimentação é ligada a uma tomada elétrica existente dentro da câmara. Para o sistema de controlo, em que é precisa uma ligação USB entre um computador e o microprocessador, a situação complica-se. Para resolver este problema, teria de se conseguir uma comunicação sem fios entre o computador e o microprocessador. Isto foi conseguido através da utilização de um *router wireless* que também será colocado dentro da câmara. Tanto a caixa que contém o sistema de alimentação como a que contém o sistema de controlo foram dimensionadas de forma a poderem ser introduzidas ou retiradas da câmara de luvas pelas portas de acesso, sem necessidade de quebrar a atmosfera controlada. Esta característica do sistema é particularmente importante para se poderem realizar operações de manutenção ou reparação no sistema. Nestas condições apenas será necessário quebrar a atmosfera da câmara uma vez, aquando da introdução da base de suporte mecânico de todo o sistema.

3.3. A resina de selagem

Epoxy é o termo habitual que designa uma resina que neste caso se vai utilizar para a colagem e vedação lateral aquando da colocação do vidro de encapsulamento.

As resinas *epoxy* são resinas de poliéster, com a estrutura apresentada na figura 11, com propriedades de plástico termofixo, ou seja, um plástico cuja rigidez não varia com a temperatura. Estas resinas, durante a cura, não originam produtos voláteis apesar da presença de um solvente volátil. As *epoxys* mais simples resultam da reação entre *bisphenol A* com *epichlorohydrine*.

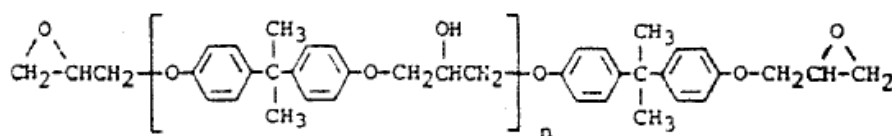


Figura 11 – Estrutura química do polímero *epoxy*. [32]

O valor de n é o número de subunidades polimerizadas e varia entre 0 e 25, e é este valor que determina as aplicações finais da resina.

A *epoxy* é uma resina constituída por polímeros com pelo menos dois grupos epóxidos. Quando a resina não está curada, possui propriedades mecânicas, químicas e de resistência ao calor fracas. No entanto, excelentes propriedades são conseguidas através da reação com agentes de cura, formando estruturas tridimensionais. A cura pode ser conseguida por reação na própria *epoxy* ou pela utilização de agentes de cura ou endurecedores. [32, 33]

As resinas *epoxy* possuem uma aplicabilidade bastante variada: adesivas, ligantes, materiais de construção, compósitos, laminados, revestimentos, moldagem e acabamentos têxteis. As suas propriedades permitem que se usem nas indústrias aeroespaciais.

A *epoxy* escolhida para este projeto é a EPO-TEK® 302-3M. É uma *epoxy* de dois componentes usada para aplicações óticas, médicas e em semicondutores, permitindo ser usada como adesivo, selagem e revestimento. Para aplicações óticas permite a realização de encapsulamentos, em LEDs por exemplo, pois possui uma transmitância elevada na gama de comprimentos de onda 350-1550 nm e pode-se utilizar para agregação de fibras e lentes; colar e fixar fibras de plástico ou de vidro aos seus revestimentos, etc. Nos semicondutores pode servir para a selagem de circuitos integrados. [34] A propriedade mais importante desta *epoxy* para este trabalho é a sua impermeabilidade a moléculas leves como a água e o oxigénio, sendo inclusivamente utilizada em missões espaciais da NASA quando se requer uma impermeabilidade extremamente elevada em vácuo e a temperaturas elevadas. [35]

A duração da cura desta *epoxy* é de 3 horas a uma temperatura de 65 °C e de 24 horas à temperatura ambiente (23 °C) depois de misturadas as duas partes.

Algumas das propriedades típicas desta *epoxy* estão na tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades físicas da *epoxy* EPO-TEK® 302-3M. [34]

Cor	Parte A: incolor; Parte B: incolor
Viscosidade (a 100 RPM/23 °C)	800 – 1600 cPs
Temperatura de transição vítrea	Superior a 55 °C
Temperatura de degradação	351 °C
Índice de refração a 23 °C	1,5446 a 589 nm
Transmitância	>95% de 460-1620 nm
Resistividade elétrica	>1x10 ¹³ Ω/cm ³

Destas propriedades, verificamos que a utilização desta *epoxy* é ideal para este trabalho de encapsulamento principalmente porque: apresenta uma resistência elétrica elevada, ou seja, não há problemas de passagem de corrente entre os elétrodos do dispositivo; tem uma viscosidade compatível com a utilização de injeção a baixa pressão, como irá ser utilizado neste trabalho; e a sua temperatura de degradação (após a cura) é elevada, não sendo afetada pelas temperaturas geradas durante o funcionamento do OLED (menores que 80 °C).

3.4. Componentes eletrónicos

Para o controlo automatizado do sistema de encapsulamento é necessária a utilização de diversos componentes eletrónicos: um microprocessador, controladores de potência para os motores, sensores (mecânicos e óticos), relés e outros componentes eletrónicos auxiliares.

3.4.1. A plataforma Arduino

O Arduino é uma plataforma eletrónica de prototipagem constituída por um microprocessador Atmel AVR de 8 bits. As principais aplicações do Arduino são o desenvolvimento de sistemas interativos que podem ser independentes ou controlados

através de um computador. Esta interatividade é possível pela existência de um suporte de entrada e saída de tensão elétrica na gama dos 0 V aos 5 V. Uma placa Arduino é constituída por todos os componentes necessários para a comunicação com o microprocessador e sua operação e uma série de canais digitais e analógicos, que podem ser definidos como entradas (*inputs*) ou saídas (*outputs*) de sinal. Possui ainda protocolos de comunicação USB e série (RS-232) para programação do microprocessador e ligação a um computador. A linguagem de programação que o Arduino processa é C/C++. Para este projeto o Arduino será essencialmente utilizado para fazer o controlo dos motores, micro-interruptores e outros sensores. A versão da placa que se utilizou foi o Arduino UNO que utiliza o microprocessador ATmega328 idêntica á que se apresenta na figura 12a.

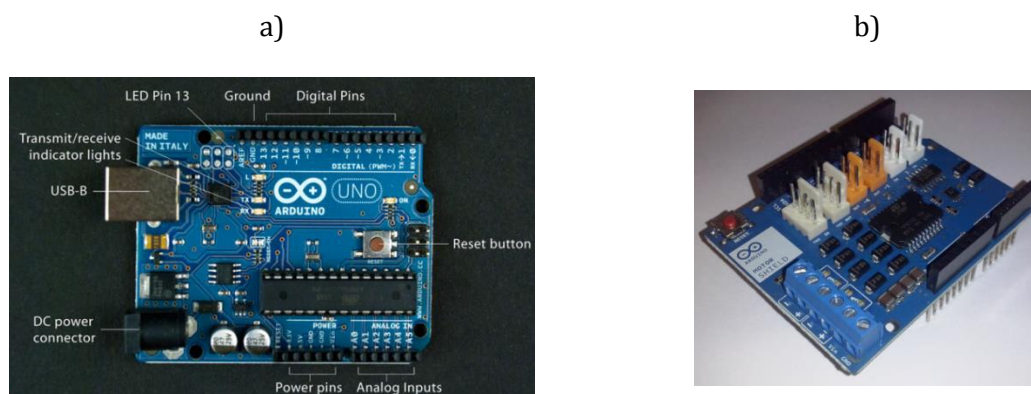


Figura 12 – a) Plataforma Arduino UNO. [36] b) Arduino Motor Shield compatível com o Arduino UNO. A alimentação e os terminais dos motores são ligados aos conectores com o parafuso.

Cada pino da placa do Arduino tem marcado a sua função. Na versão do Arduino UNO existem 13 pinos digitais, no entanto, dois deles (o 0 e o 1) servem como interface de comunicação série, temos portanto 11 pinos digitais disponíveis marcados como digitais mas que também podem ser usados como analógicos. Os pinos marcados de A0 a A5 são pinos analógicos, no entanto, podem ser utilizados igualmente como digitais. Podemos então ter um máximo de 17 pinos digitais nesta versão. A terra (*ground*) do Arduino é referenciada por GND. Existe um pino de alimentação de 5 V e outro de 3,3 V, um botão de *reset* e um pino referenciado de *Vin* para alimentar externamente o Arduino. [37]

Uma das vantagens de utilizar o sistema Arduino reside na existência no mercado de placas de extensão de funções e potências, chamadas de *shield*, e de baixo custo. Estas placas totalmente compatíveis com o Arduino, quer eletronicamente quer mecanicamente, disponibilizam diversas funções como o controlo de motores, sistemas de comunicação sem fios, entre outros.

O Arduino, só por si, não gera corrente suficiente para fazer mover motores, que necessitem de um torque elevado, como é o caso deste projeto. Desta forma é necessário a utilização de controladores para motores. Para controlo de motores o Arduino disponibiliza um *shield* denominado *motor shield* (figura 12b), que gera mais corrente para os motores que o Arduino só por si. O inconveniente da utilização deste *shield* é o facto de apenas ser possível controlar um motor passo a passo por Arduino. A quantidade de motores a controlar neste projeto são quatro pelo que se teve que optar por outra solução mais vantajosa. Assim optou-

se pela utilização de controladores externos, eletronicamente compatíveis com o Arduino, mas que permitiram controlar os quatro motores utilizando um Arduino UNO.

3.4.2. Controlo de potência dos motores

Selecionaram-se dois controladores de potência dos motores em função das necessidades de cada um, produzidos pela empresa Sparkfun: o EasyDriver e o Big EasyDriver, representados na figura 13. Estes controladores foram utilizados para o aumento do torque nos motores passo a passo, permitindo alimentar cada fase de um motor com uma corrente até 750 mA no primeiro caso e de 2 A no segundo a uma tensão de alimentação de 7 V a 30 V. Estes possuem diversas vantagens relativamente aos *shields* da Arduino, nomeadamente o facto de cada um apenas necessitar de dois pinos digitais do Arduino para o controlo de um motor passo a passo. Assim, para o controlo dos quatro motores são necessários 8 pinos, restando ainda vários pinos para controlo de outros componentes. Uma outra vantagem da utilização deste controlador é a precisão de deslocamento que é possível obter. Um EasyDriver permite uma precisão de $\frac{1}{8}$ do passo do motor e um Big EasyDriver uma precisão de $\frac{1}{16}$ do passo do motor. Os circuitos integrados de ambos aquecem consideravelmente em funcionamento contínuo, pelo que é importante a utilização de dissipadores de calor. Os terminais de cada fase do motor são devidamente conectados à referência A e B da placa, e as conexões STEP e DIR definem respetivamente, o passo do motor e a direção do movimento e são ligados a dois pinos digitais do Arduino (figura 14). A terra dos EasyDriver tem que estar ligada à do Arduino para funcionar corretamente. [38] [39]

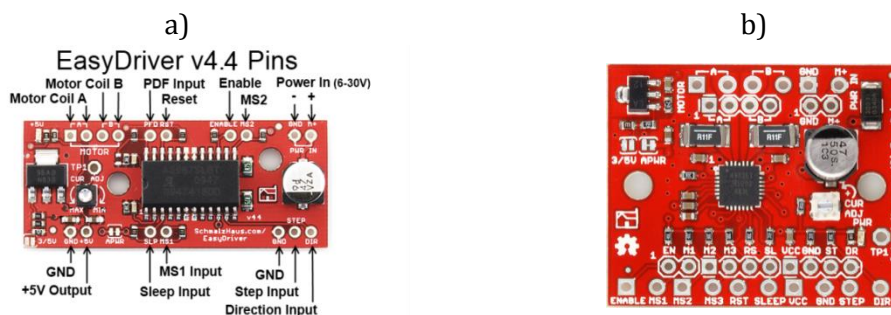


Figura 13 - a) EasyDriver v4.4. b) Big EasyDriver [40]

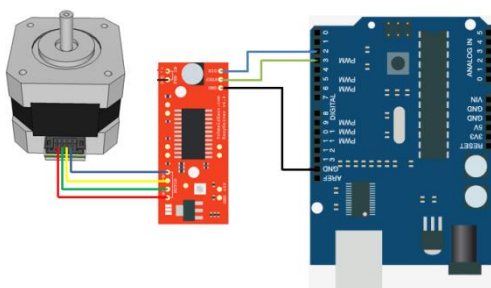


Figura 14 – Esquema das ligações entre o EasyDriver, o Arduino e um motor passo-a-passo. No Big EasyDriver fazem-se as ligações da mesma forma.

Estes controladores possuem diversas funcionalidades. A figura 13 mostra outras conexões que ativam outras funções. Utilizando as conexões MS1 e MS2 é possível regular a

precisão do motor, ou seja, determinar se um pulso de tensão na conexão STEP vai mover o motor $\frac{1}{8}$ do passo, $\frac{1}{4}$ do passo, $\frac{1}{2}$ do passo ou um passo completo. Isto é regulável de acordo com as combinações lógicas que se colocam nestas conexões. No caso padrão, as conexões MS1 e MS2 estão puxadas a *HIGH* (5 V) através das resistências *pull-up*, e assim a resolução é de $\frac{1}{8}$ do passo. A tabela 2 mostra como se deve proceder para obter outras resoluções de passo.

Tabela 2 – Configuração do passo dos motores no EasyDriver [38]

MS1	MS2	Resolução
<i>LOW</i>	<i>LOW</i>	Passo completo
<i>HIGH</i>	<i>LOW</i>	$\frac{1}{2}$ Passo
<i>LOW</i>	<i>HIGH</i>	$\frac{1}{4}$ Passo
<i>HIGH</i>	<i>HIGH</i>	$\frac{1}{8}$ Passo

Tabela 3 – Configuração do passo dos motores no Big EasyDriver. [39]

MS1	MS2	MS3	Resolução
<i>LOW</i>	<i>LOW</i>	<i>LOW</i>	Passo completo
<i>HIGH</i>	<i>LOW</i>	<i>LOW</i>	$\frac{1}{2}$ Passo
<i>LOW</i>	<i>HIGH</i>	<i>LOW</i>	$\frac{1}{4}$ Passo
<i>HIGH</i>	<i>HIGH</i>	<i>LOW</i>	$\frac{1}{8}$ Passo
<i>HIGH</i>	<i>HIGH</i>	<i>HIGH</i>	$\frac{1}{16}$ Passo

Para controlar o passo pretendido, devem-se ligar as conexões ao Arduino e fazer o controlo pela programação, colocando os pinos em *HIGH* ou *LOW*.

O potenciômetro associado ao controlador permite regular o máximo de corrente que vai para os motores. Se precisarmos de regular o torque necessário para que um atuador funcione corretamente, a utilização deste componente é importante.

A conexão *Enable* ativa ou desativa todas as saídas. Quando está definido como *HIGH* as saídas são desativadas, e quando *LOW* o chip é ativado e o motor energizado. É possível controlar a ativação/desativação através de um microprocessador.

A conexão *Reset*, quando é puxada a *LOW*, o circuito do controlador desliga e reinicia quando está *HIGH* novamente.

A conexão *Sleep* pode ser utilizada para minimizar o consumo de energia quando não está em uso, desativando parte do circuito interno, incluindo as saídas. Quando está *HIGH*, o controlador funciona normalmente e para desativar puxa-se a *LOW*. [38]

O funcionamento do Big EasyDriver é semelhante ao do EasyDriver. A principal diferença é a precisão do passo. Neste caso, existem três conexões MS1, MS2 e MS3 também puxados a *HIGH*. A configuração do passo neste controlador através das combinações lógicas está descrita na tabela 3.

3.4.3. Sensores de posição (Micro-interruptores)

Os micro-interruptores são sensores mecânicos colocados numa, ou nas duas extremidades de cada atuador para controlo de posicionamento, das posições iniciais dos diferentes movimentos e como forma de segurança para bloquear o movimento em caso de colisão iminente com as peças. Os micro-interruptores utilizados são os botões semelhantes aos que se usam em ratos de computador com um braço metálico para garantir que é ativado quando atingido por algo. Foram utilizados no total 7 micro-interruptores, quatro na mesa

XY, ou seja, dois na extremidade de cada atuador (X e Y), dois no atuador da seringa e um no atuador que coloca o encapsulamento.

Quando o micro-interruptor é ativado fecha um circuito que coloca 5 V num pino digital do Arduino que está definido como *INPUT* e 0 V quando desativado. Desta forma, faz-se o controlo pretendido pela programação no Arduino. Estes micro-interruptores estão envolvidos em diversas fases do funcionamento do sistema, nomeadamente:

Retorno à posição de referência: Quando queremos iniciar ou reiniciar o processo de encapsulamento deve realizar-se primeiro o regresso às posições iniciais em cada um dos estágios, ou seja, cada movimento de cada motor tem que partir de uma posição de referência que é dada pela ativação de micro-interruptores. Primeiramente, um motor de cada vez provoca o movimento do atuador associado na direção do micro-interruptor, com uma velocidade relativamente rápida. Quando o atuador bate no braço que está associado ao micro-interruptor, este é ativado e o movimento não se processa mais nesse sentido. Poderia ser esta a posição inicial, em que o atuador se move e para quando atinge o micro-interruptor, mas para dar mais precisão ao sistema vai-se retirar a folga, desativando-o. Isto faz-se a uma velocidade lenta para obter uma maior precisão. Sucintamente, o atuador move-se rapidamente até ativar o micro-interruptor e de seguida move-se no sentido contrário lentamente até estar desativado, parando assim que é desativado, e a posição de referência está encontrada;

Paragem de segurança: No caso de o utilizador se enganar a enviar os comandos para o Arduino e envie valores que ultrapassem a distância máxima possível em cada movimento, os motores tenderiam a mover-se até que o processo estivesse concluído, fazendo com que cada movimento colidisse com os limites das peças, forçando-as umas contra as outras e trancando o movimento do motor, podendo-o danificar. Desta forma, os mesmos micro-interruptores servem como forma de segurança, quando o braço tocar no micro-interruptor e o ativar, o movimento vai parar e o processo de encapsulamento tem que ser corrigido e reiniciado.

3.4.4. Relé

Um relé é um interruptor eletromecânico que altera o estado dos contactos quando é aplicada uma tensão elétrica a uma bobine incorporada. A bobine cria um campo magnético que atrai a alavanca que faz a mudança do estado dos contactos. Uma das aplicações do relé que é também utilizada no sistema é utilizar baixas potências elétricas para ativar um outro circuito de potência superior.

Os relés utilizados neste sistema permitem o controlo de dois circuitos, em que o primeiro está ativado e o segundo desativado. Temos então um interruptor com três terminais. Quando a bobina do relé é alimentada eletricamente, ocorre a mudança dos contactos e o primeiro circuito passa a estar desativado e o segundo ativado.

A bobine é constituída por um fio metálico em torno de um núcleo de aço. Este núcleo de aço é responsável pela baixa relutância do fluxo magnético. Enquanto a bobine está desativada, os contactos que estão presos a molas, mantêm o seu estado de repouso. Quando

a bobine recebe corrente elétrica, a força magnética gerada é superior à força das molas e o contacto é atraído fisicamente, saindo do repouso e mudando a condição do circuito. Quando a alimentação da bobine é desligada, o contacto volta ao estado de repouso pela força da mola. [41]

No sistema, vão ser utilizados dois relés, um deles para ativar o circuito da resistência de aquecimento e outro para ativar a bomba de sucção.

3.4.5. Termopar

Um termopar é utilizado como sensor para fazer o controlo da temperatura no estágio de aquecimento. Os termopares consistem na junção de dois fios metálicos, de diferentes funções de trabalho, num ponto. Este ponto de conexão é a junção de medição, onde se gera uma tensão que varia com a temperatura. Um termopar é um componente de baixo custo que pode medir uma elevada gama de temperaturas. [41]

O termopar utilizado foi do tipo K, um dos fios contém 90% de níquel e 10% de crómio (*Chromel*) que corresponde ao ânodo e o outro contém 95% de níquel, 2% de manganésio, 2% de alumínio e 1% de silício (*Alumel*), o cátodo. Este termopar tem uma sensibilidade de aproximadamente $41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, com uma gama de medição de temperatura de -200°C a 1350°C . [42]

A diferença de potencial que se gera com a temperatura é um sinal fraco, à temperatura ambiente mede-se cerca de 3 mV utilizando um multímetro, contando com um erro de cerca de 1 mV. O Arduino não consegue medir variações de tensão tão baixas, assim é necessário um circuito de amplificação do sinal do termopar. Para isto utilizou-se um amplificador operacional (OPAMP) na configuração não inversora, com um ganho de cerca de 1000 para obter uma tensão na gama dos 0 V aos 5 V. O sistema de controlo de temperatura foi posteriormente calibrado.

3.4.6. Fotoresistência

Para a construção de um sistema de posicionamento do OLED optou-se pela utilização de um feixe de luz muito direcionado, para que faça reflexão na pista de alumínio dos OLEDs e incida num sensor. A fonte de radiação utilizada foi um laser e o sensor uma fotoresistência.

Uma fotoresistência, também conhecida por resistência dependente de luz (inglês: *Light Dependent Resistor*, LDR), é um dispositivo cuja resistência varia com a quantidade de luz que nele incide. Este sensor permite fazer o controlo de sistemas em função da luz presente e utilizou-se para a construção de um sistema de posicionamento do OLED. Para isto utilizou-se um laser para fazer incidir um feixe de luz nas pistas de alumínio que vai refletir e incidir na LDR. O laser é ideal para esta função pois origina um feixe de luz bem direcionado.

As LDR são feitas de materiais semicondutores de alta resistência, o mais comum é o sulfureto de cádmio (CdS). Esta alta resistência deve-se a haver poucos eletrões livres e capazes de se moverem porque ficam presos na rede cristalina. Quando a luz, com energia suficiente, incide no material semicondutor, este absorve os fotões de luz e esta energia é transferida para os eletrões permitindo que estes transitem para a banda de condução. O

eletrão livre e a sua lacuna conduzem a eletricidade, aumentando a condutividade e assim, diminuindo a resistência. Tipicamente, os valores de resistência variam entre 1 M Ω no escuro e 100 Ω na claridade. [43]

As alterações de resistência devidas à variação da quantidade de radiação que atinge o sensor por reflexão na pista de alumínio e consequentemente, dependente da posição do OLED relativa a uma referência, permitiram determinar o correto posicionamento do OLED a encapsular. Para medir estas variações foi montado um circuito divisor de tensão que alimenta um dos pinos analógicos do Arduino. Em função da tensão neste pino o sistema de controlo movimentará o OLED para a posição correta.

3.4.7. Motores passo-a-passo

A escolha do tipo de motores responsáveis pelos movimentos dos atuadores recaiu sobre os motores passo-a-passo por várias razões: eram fáceis de obter a partir de impressoras avariadas; possuem de forma geral torque suficiente para as funções pretendidas; são fáceis de controlar e permitem uma resolução de movimento de rotação suficientemente elevada e controlável.

Um motor passo-a-passo é um dispositivo eletromecânico que converte pulsos elétricos em movimentos mecânicos discretos. O veio do motor roda em passos discretos quando pulsos sequenciais de tensão são aplicados. Esta sequência de pulsos está diretamente relacionada com a direção do movimento e a sua velocidade é proporcional à frequência dos pulsos e a duração da rotação é dada pelo número de pulsos aplicados. O motor divide uma rotação completa num determinado número de passos. [41] No sistema desenvolvido, os motores utilizados na mesa XY são iguais e possuem 400 passos por volta e para os atuadores lineares utilizaram-se motores com 200 passos por volta. Todos os motores são do tipo bipolar. Um motor passo-a-passo é uma excelente escolha quando se requerem movimentos muito bem controlados. Podem ser utilizados quando é necessário o controlo do ângulo de rotação, velocidade, posição e sincronização. Com estas propriedades, este tipo de motores são utilizados em impressoras, *plotters*, *scanners*, sistemas de produção, discos rígidos, leitores de CD/DVD e disquetes, equipamento médico, máquinas de fax, entre outros.

A figura 15a mostra um esquema de um corte transversal do rotor e do estator de um motor. A potência aplicada alimenta cada par de bobines e desta forma, o par de bobines comporta-se como um íman. Uma das bobines representa o polo norte e a outra o polo sul. Assim, a bobine do estator vai atrair o dente do rotor mais próximo que tem polaridade oposta. Quando a corrente flui por estes polos, o rotor terá uma atração mais forte às bobines do estator, que aumenta o torque do motor. Mudando a corrente para o estator seguinte, o campo magnético vai-se alterar e o rotor vai-se mover. O campo magnético é continuamente alterado até que o rotor dê uma volta completa. No primeiro esquema da figura os dentes do rotor estão alinhados com os do estator 1 e 5, significando que este par de bobines está alimentado. Quando alimentar o par seguinte (2 e 6) o rotor vai-se mover até alinhar novamente os seus dentes mais próximos com os do estator. [44]

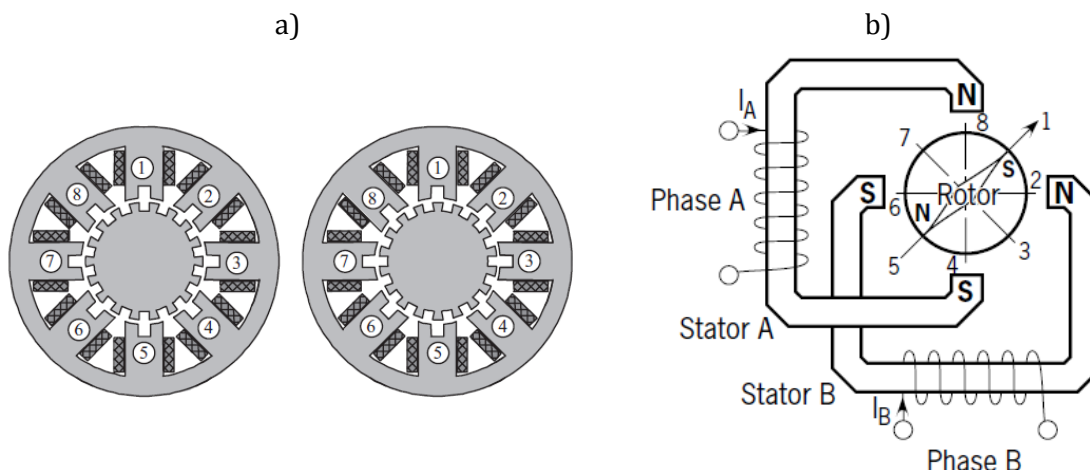


Figura 15 - a) Esquema de um corte transversal de um motor passo-a-passo. [44] b) Modelo de funcionamento de um motor bipolar. [45]

A figura 15b representa o funcionamento de um motor passo-a-passo do tipo bipolar. Estes motores são constituídos por estatores dentados e rotores com um elevado número de dentes. Quanto maior for o número de dentes, maior é a precisão do motor, porque possui mais passos por volta. Este tipo de motor necessita que cada fase do motor seja alimentada de forma sequencial com pulsos de tensão, sendo o tipo de motor passo-a-passo que apresenta um melhor desempenho de torque. [41] Tipicamente este tipo de motores necessita de potências elétricas de cerca de 1 W para pequenos motores e entre 10-20 W para maiores. O torque produzido pelo motor depende principalmente da potência de alimentação. Também depende do passo do motor e do tipo de controlador de potência que se utiliza, pois é proporcional à intensidade do campo magnético gerado quando as bobinas se ativam, que é proporcional à corrente. É então importante a utilização de um controlador que gere corrente suficiente para obter um torque elevado.

3.5. Sistema mecânico

3.5.1. Mesa XY

A mesa XY consiste numa plataforma que se pode mover a duas dimensões, esta transportará o OLED nos diferentes estágios de encapsulamento. As dimensões da plataforma principal são de 10x6 cm, área suficiente para a colocação de diferentes tamanhos e formas de OLED que se fabriquem. Na figura 16 mostram-se fotos e detalhes da mesa XY. O desenho das várias peças que constitui o sistema mecânico foi realizado em computador, utilizando o *software* Google SketchUp. As peças foram construídas na oficina de metalomecânica do Departamento de Física.

O movimento das duas dimensões da mesa funciona pela rotação de um veio roscado. O negativo da rosca é uma peça que está fixa em cada uma das calhas. A rotação dos veios é realizada pelo movimento de motores passo-a-passo, um para cada direção de movimento (X e Y). No total, cada atuador da mesa pode percorrer 16,6 cm entre cada extremidade. O motor é fixo através de uma peça própria e é ligado ao veio roscado através de um *cardan*. Os *cardans* são utilizados para corrigir eventuais desalinhamentos durante a montagem de todo o sistema permitindo uma melhor transmissão de força entre o motor e o veio roscado.

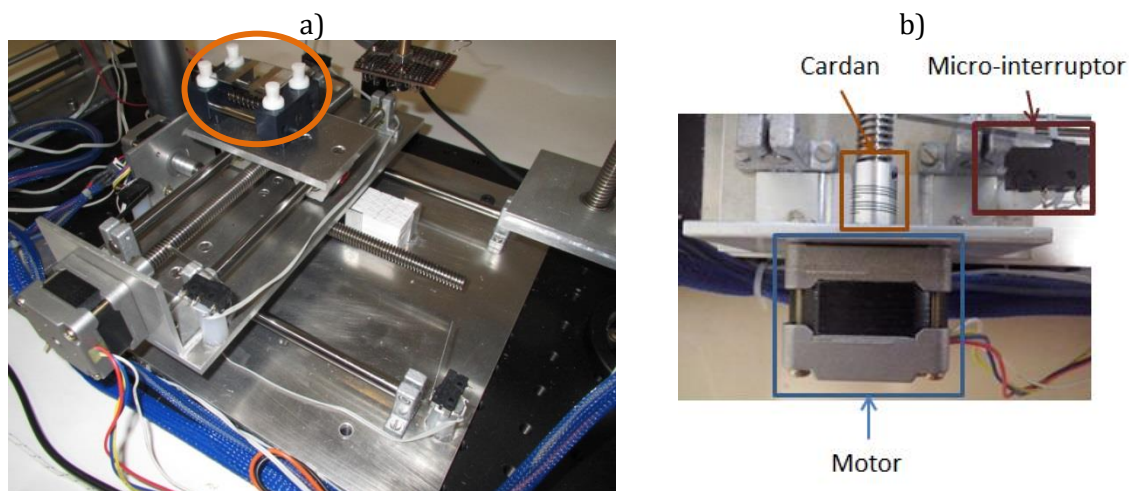


Figura 16 – a) Fotografia da mesa XY com identificação do torno de relógio com um OLED colocado e b) identificação de alguns componentes.

Associados aos dois movimentos, foram colocados dois micro-interruptores nos limites de cada dimensão. Estes funcionam como sensores de paragem e posicionamento para regresso às posições iniciais.

A plataforma com movimento XY é a base móvel que permite a colocação de diversos tipos de suporte de OLEDs ou outros dispositivos a encapsular. Em função das especificidades dos OLEDs desenvolvidos no Departamento de Física optou-se por dotar o suporte com um pequeno torno (chamado torno de relógio) que permite a fixação de OLEDs com diferentes formas e sem faces perfeitamente paralelas, com dimensões até 55 mm. O torno não está fixo de forma permanente à plataforma, mas sim encaixado em pinos de alinhamento e fixação, permitindo retirá-lo da sua posição para colocar/trocar o OLED antes do início do processo de encapsulamento. Esta característica é muito importante pois permite facilitar o processo de encaixe do OLED no suporte mesmo com as condicionantes do operador estar a utilizar as luvas, habitualmente grossas, dentro da câmara.

Pelas características dos próprios OLEDs produzidos com substratos de dimensões aproximadas, posicionamento das pistas de alumínio e de ITO com pequenas variações de OLED para OLED e do processo manual da sua colocação no suporte, a posição do OLED no torno pode não ser sempre a mesma. Isto levaria a um problema de posicionamento nas fases seguintes, com particular incidência aquando da deposição de *epoxy* e também da colocação do vidro de encapsulamento. Para resolver este problema desenvolveu-se um pequeno sistema de identificação e correção do posicionamento do OLED. Tirando partido das pistas de alumínio que são bastante refletoras, desenvolveu-se e construiu-se um sistema constituído por um laser e um sensor de luz, uma fotoreistência, como se explicará na secção 3.6.4.

3.5.2. Sistema de deposição da resina

A resina *epoxy* é depositada através da pressão induzida pelo movimento de um êmbolo numa seringa. A peça que permite o movimento do êmbolo consiste num movimento linear que empurra ou puxa um êmbolo que está inserido numa seringa fixa à peça (figura

17a). Este movimento é realizado pela rotação de um veio roscado induzido por um motor passo a passo, cuja união ao motor é feita por um *cardan*. Será este o processo que irá requerer mais desempenho de força do motor. Para perceber que tipo de motor e de controlador se teria que escolher para a movimentação do êmbolo da seringa foram realizados ensaios para verificar qual a ordem da força necessária a fazer no êmbolo de uma seringa de 10 mL para que fosse verificada a saída de *epoxy* de forma contínua. Foi medida uma força máxima de cerca de 180 N. Este valor, ainda que sendo um valor máximo, permitiu concluir que, dos vários motores disponíveis, deveria ser utilizado aquele que gerasse maior torque de forma a produzir uma força linear suficiente. Perante esta situação optou-se também pela utilização de um controlador mais potente, o Big EasyDriver, que induz mais corrente, para garantir o movimento deste atuador.

A seringa utilizada para o sistema de deposição foi oferecida como amostra para experimentação por uma empresa comerciante de sistemas de dosagem automática, a Dotest, S. L. A seringa utilizada possui uma ligação do tipo *luer lock* na extremidade para fixação simples, rápida e segura de pontas e um volume de 100 ml. Repare-se que esta seringa é apenas responsável pela criação da pressão necessária para a deposição da resina. A *epoxy* não está em contacto com esta seringa. A deposição de *epoxy* é realizada na posição vertical, no entanto não é necessário que o atuador seja colocado na posição vertical. Decidiu-se que este movimento seria realizado horizontalmente e a conexão entre uma ponta volumétrica que conterà a resina e a seringa é feita por um tubo de plástico flexível. Foi construído então um conjunto de peças que permitisse a colocação fácil de pontas volumétricas de pipetas, pré-carregadas de *epoxy*, com a possibilidade de regulação de altura entre a extremidade da ponta e o OLED. Este sistema vertical é constituído por uma peça extensora para permitir que a ponta possa ser colocada sobre a mesa, à qual está associada um estágio micrométrico linear com regulação manual, e finalmente, associada a esta, está a peça que suporta o tubo e a ponta volumétrica (figura 17b). O tubo conector entre a seringa e a ponta terá numa extremidade o negativo da ligação *luer lock* da seringa por forma a conectar-se nela, e na outra extremidade a mesma conexão *luer lock* que a seringa, onde serão fixadas as pontas adaptadas a *luer lock*.

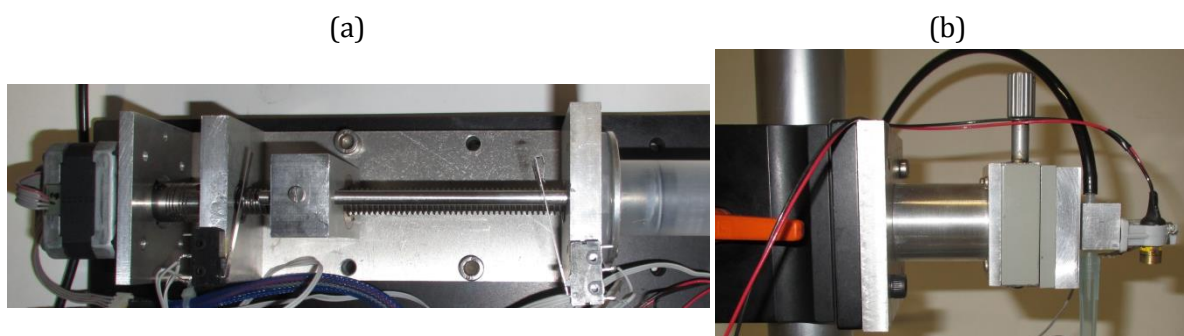


Figura 17 – a) Fotografia do atuador linear que empurra/puxa o êmbolo da seringa. b) Fotografia da peça extensora constituída pela mesa micrométrica e o suporte para as pontas volumétricas.

Este atuador pode percorrer um máximo de 10,3 cm entre cada extremidade. O controlo manual da distância entre a ponta da pipeta com *epoxy* (realizado no parafuso da mesa micrométrica) e o OLED a encapsular pode-se revelar difícil dentro da câmara de luvas,

que dificulta a visualização adequada da altura da ponta volumétrica em relação ao OLED. Para resolver este problema, montou-se uma *webcam* na placa base do sistema próxima da ponta e do OLED, obtendo-se uma visualização tangencial perfeitamente adequada aos objetivos de posicionamento. Através da imagem produzida pela *webcam* no computador o utilizador controla a mesa micrométrica de uma forma mais precisa.

3.5.3. Sistema de colocação do vidro de encapsulamento e aquecimento

O sistema de colocação do vidro de encapsulamento consiste num atuador de movimento linear idêntico ao do sistema de deposição de *epoxy*. A colocação do vidro é realizada na vertical pelo que a peça é colocada na posição vertical, fixa a uma outra torre com uma placa de furação universal. O que se move neste atuador é um veio com uma ventosa e a resistência de aquecimento como se pode ver na figura 18. A ventosa irá fazer sucção no vidro, quando a bomba de sucção for ativada. A ventosa está fixa num dos lados de um tubo oco metálico que está fixo no atuador, o outro lado do tubo liga à bomba de sucção através de um tubo de silicone. Assim, este atuador será responsável por agarrar o vidro de encapsulamento do “armazém” situado na base da mesa XY e coloca-lo sobre o OLED, podendo exercer ou não pressão. Por fim, a resistência de aquecimento é ligada por um relé controlado pelo Arduino, aquecendo a *epoxy* para acelerar a sua cura e permitir manusear de forma segura o OLED agora encapsulado e recomeçar o processo de encapsulamento doutro OLED.

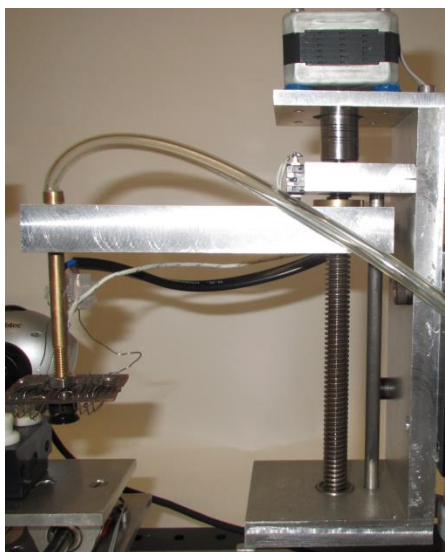


Figura 18 - Fotografia do atuador linear que desce/sobe a ventosa e a resistência de aquecimento.

3.6. Sistema elétrico

O sistema elétrico é constituído por diversas placas de circuitos e ligações entre si, devidamente acondicionados numa caixa e uma fonte de alimentação. Pela necessidade de eventual manutenção ou até reparação aos diversos circuitos as dimensões da caixa foram limitadas de forma a permitir a sua retirada/introdução na camara de luvas pelas portas de acesso sem quebrar a atmosfera controlada no seu interior. O mesmo cuidado foi tido com a

fonte de alimentação, que foi aproveitada de um computador já fora de uso. Os componentes da caixa de circuitos são alimentados com tensões que podem ser de 12 V e de 5 V, e são estas as tensões que dão entrada na caixa através da fonte. Na construção deste sistema teve-se em conta a intensidade de corrente que poderia passar por cada fio e por cada conector, sendo a referência de terra da fonte ligada à terra do Arduino. Dentro da caixa foi montado um Arduino UNO, três EasyDrivers, um Big EasyDriver e uma outra placa de circuitos auxiliar para o controlo de relés e temperatura. O controlo do sistema pode ser feito pela comunicação entre um computador e o Arduino por USB ou por *wireless*, através de um *router*. Tendo em conta o calor que se gera pelo funcionamento dos controladores de potência, construiu-se um sistema de dissipação de calor na caixa, utilizando um dissipador para cada par de EasyDrivers e uma ventoinha por cima deles, fixa na superfície superior da caixa. Os EasyDrivers estão fixos na caixa por espaçadores mais longos por forma a estarem mais próximos da ventoinha. O Arduino e a placa de circuitos auxiliar estão fixos à caixa utilizando espaçadores mais curtos e afastados das fontes de calor. A figura 19 mostra cada um dos painéis da caixa. Um dos painéis corresponde à entrada de diferentes formas de tensão na caixa, e o outro corresponde à saída para o controlo do sistema.

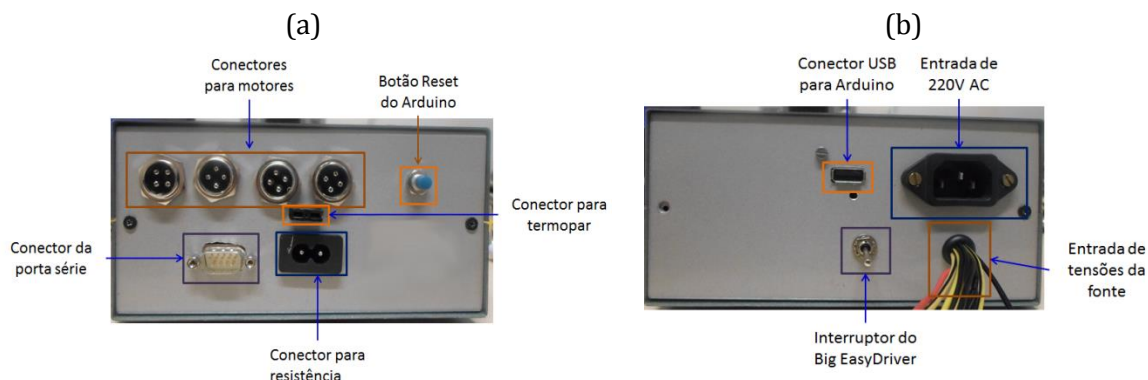


Figura 19 – a) Pannel de saída da caixa. b) Pannel de entrada da caixa.

Além das diferentes conexões foram colocados dois interruptores. O interruptor de pressão do painel de saída faz o *reset* do Arduino, pode ser útil no caso emergente de querermos interromper algum processo. O interruptor do painel de entrada permite ao utilizador ligar e desligar o Big EasyDriver, este controlador gera uma corrente muito elevada que causa o seu próprio aquecimento e o do motor, por isso, sugere-se que quando não estiver a ser usado, seja desligado. Este cuidado é particularmente importante para evitar o aquecimento de outras zonas da camara de luvas uma vez que o gás utilizado é azoto que possui uma excelente condutividade térmica. O conector de entrada de tensão de 220 V AC não é utilizado, no entanto, foi colocado na hipótese de haver alterações futuras em que seja necessária a sua utilização, por exemplo, para alimentação de uma outra resistência de aquecimento a 220 V AC.

3.6.1. Fonte de alimentação

A fonte de tensão elétrica usada para alimentar os componentes do sistema elétrico é uma fonte de alimentação recuperada de um computador antigo com caixa ATX com uma potência máxima de 550 W. Este tipo de fontes possui diversas saídas de tensão: +3,3 V, +5 V,

+12 V, -5 V e -12 V. Para alimentação dos diversos componentes utilizaram-se as tensões de 5 V e de 12 V. Estas fontes são boas para trabalhos em que é necessária elevada corrente. Os controladores de potência e a resistência de aquecimento necessitam de um total de corrente elevada se estiverem todos ligados ao mesmo tempo, cerca de 7 A. A corrente máxima a 5 V são 40 A e a 12 V de 16 A, corrente suficiente para alimentar os componentes necessários sem ocorrer efeito de carga.

3.6.2. Controlo de potência dos motores (EasyDrivers)

Para controlo de motores fizeram-se as ligações dos controladores ao Arduino, ligando os conectores STEP e DIR a cada pino digital do Arduino (figura 20), do lado do EasyDriver os fios são soldados diretamente aos conectores e do lado do Arduino são soldados a *headers* que ligam ao Arduino. As conexões para os motores são ligadas a uma ficha de quatro terminais que está fixa ao painel da caixa, num total de quatro fichas. A corrente nos fios que ligam aos motores é elevada, pode ir dos 750 mA nos EasyDrivers e aos 2 A no Big EasyDriver, assim utilizaram-se fios condutores apropriados (18 AWG), permitindo a passagem de corrente sem ocorrer aumento da temperatura. Do lado do sistema mecânico foram utilizados conectores ATX de quatro terminais, os mesmos que se usam nas fontes de alimentação para alimentar discos rígidos e leitores de CD/DVD. Também estes conectores são bons para esta gama de correntes. Por fim, fazem-se as ligações aos motores através dos próprios conectores de origem. Todos os EasyDrivers são alimentados a 12 V pela fonte.

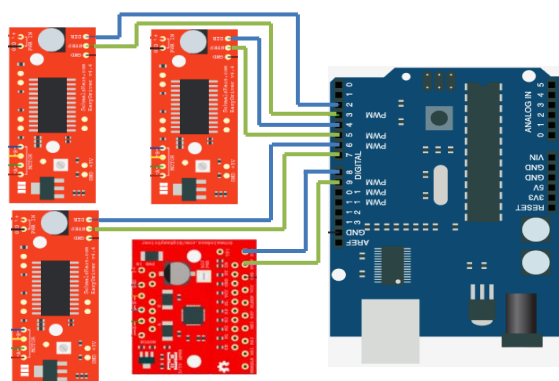


Figura 20 - Ligações dos EasyDrivers ao Arduino.

No Arduino, oito dos pinos digitais vão ser ocupados para fazer o controlo dos quatro controladores, os pinos do 2 ao 9. As terras dos EasyDrivers estão ligadas através da referência da alimentação.

3.6.3. Micro-interruptores

Para controlo dos micro-interruptores é necessário um circuito auxiliar de resistências. Quando os pinos do Arduino estão definidos como *INPUT*, devido à sua sensibilidade, os componentes medem vários sinais que provocam flutuações de tensão quando está a ler. Para puxar a tensão para 0 V coloca-se uma resistência de *pull-down*, neste caso de 10 k Ω , para que quando o micro-interruptor não estiver ativado ser medido 0 V no Arduino. A figura 21 apresenta o circuito esquemático.

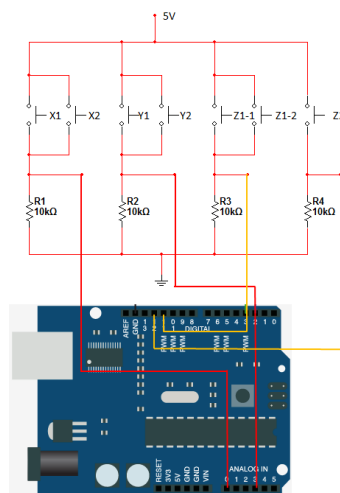


Figura 21 - Circuito esquemático dos micro-interruptores e ligação ao Arduino.

Os micro-interruptores de cada atuador da mesa XY e do atuador da seringa estão ligados em paralelo, é necessário portanto um pino de controlo de entrada para cada atuador. Para controlo do sistema de posicionamento por micro-interruptores precisam-se de quatro pinos do Arduino. Para o atuador X, utiliza-se o pin analógico A0, mas que neste caso está definido como digital (com o número 14), para o Y utiliza-se o A3, igualmente definido como digital (com o número 17), para o atuador que coloca o encapsulamento usa-se o digital 11 e para o sistema de deposição de *epoxy* o digital 12. A tomada que faz a comunicação dos micro-interruptores com o sistema é uma ficha série de 9 terminais, dos quais 4 correspondem a um dos terminais de cada um, e um que corresponde ao comum dos 5 V, sobrando ainda 4 terminais para outros componentes.

3.6.4. Sistema de posicionamento do OLED

Para o sistema de posicionamento do OLED, ou seja, o sistema que encontra a posição do OLED relativamente ao seu suporte, utilizou-se um laser vermelho e uma fotoresistência segundo a figura 22a.

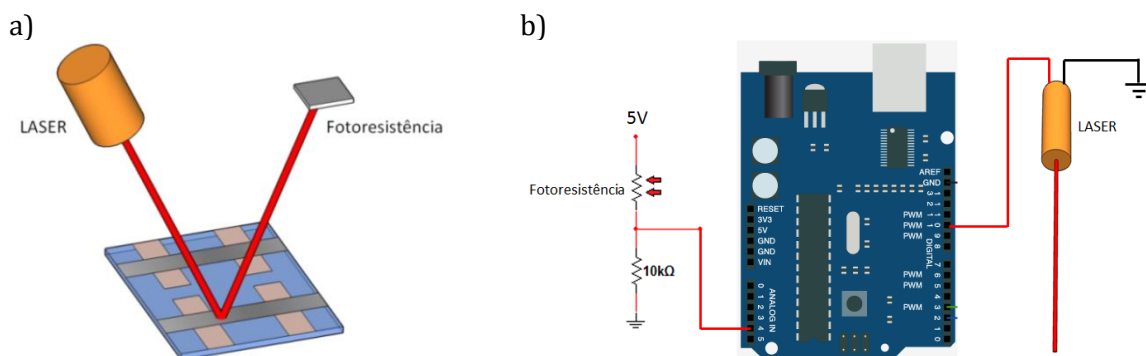


Figura 22 - a) Esquema do sistema de posicionamento do OLED, o feixe do LASER reflete na pista de alumínio e incide na fotoresistência. b) Circuito esquemático do sistema de posicionamento.

O laser tem que ser alimentado a 3 V, portanto tem que se utilizar um pino do Arduino que permita colocar tensões na gama contínua entre os 0 V e os 5 V. Só os pinos marcados como PWM (*Pulse-Width Modulation*) permitem uma saída analógica de tensão. O laser é

alimentado através do pino 10 do Arduino. Dos quatro terminais que sobram na ficha série, utilizam-se dois para alimentação do laser, o que leva os 3 V, e outro ligado à terra do sistema.

O circuito da fotoresistência é constituído por um divisor de tensão, cuja variação do valor da resistência do sensor com a incidência de luz, provoca uma variação de tensão que é medida pelo Arduino. O circuito esquemático montado está representado na figura 22b. O valor de tensão é medido pelo pino A4 do Arduino e desta forma controla-se o sistema dependendo da quantidade de luz que o sensor recebe pela reflexão do feixe laser na pista de alumínio do OLED. Utilizou-se mais um terminal da ficha série para fazer a ligação para o Arduino, quanto à ligação à terra deste circuito utilizou-se o terminal já existente. Sobra um terminal na ficha série.

3.6.5. Sistema de controlo de temperatura

O controlo da temperatura conta com a utilização de um termopar e um circuito de amplificação, utilizando um OPAMP na configuração não-inversora. Neste caso, o termopar conecta-se a uma ficha, que foi retirada de um multímetro fora de uso e adaptada ao painel. O ânodo do termopar é ligado à entrada não inversora de um OPAMP e o cátodo à terra. O OPAMP é alimentado positivamente a 5 V e negativamente à terra como está esquematizado na figura 23. O ganho do circuito amplificador é $G = 1 + \frac{R_2}{R_1}$. As resistências utilizadas foram R1 de 1 k Ω e R2 de 1 M Ω , ambas com um erro de 5%. Obtêm-se um ganho de três ordens de grandeza. A tensão de saída do OPAMP é medida pelo Arduino no pino analógico A4. Este é o sistema que controla a temperatura de uma resistência de aquecimento que está embebida no atuador que coloca o vidro de encapsulamento. O controlo é feito pela ativação e desativação da alimentação da resistência de aquecimento. Quando a temperatura medida pelo termopar é superior a um valor pré-definido (neste caso 60 °C), a resistência desliga, e quando está abaixo, volta a ligar sendo a temperatura medida a cada segundo. Para que a resistência de aquecimento seja ativada é necessária a utilização de um relé que vai ser controlado pelo Arduino. O Arduino só por si, não gera corrente suficiente para ativar o relé, que necessita de pelo menos 140 mA. É necessário então usar a fonte de tensão externa para alimentação do relé a 5 V e para fazer o controlo de liga/desliga pelo Arduino e ainda a utilização de um circuito de controlo para o relé que conta com a utilização de um transistor BJT npn que vai funcionar como interruptor. O circuito esquemático desenvolvido é o seguinte:

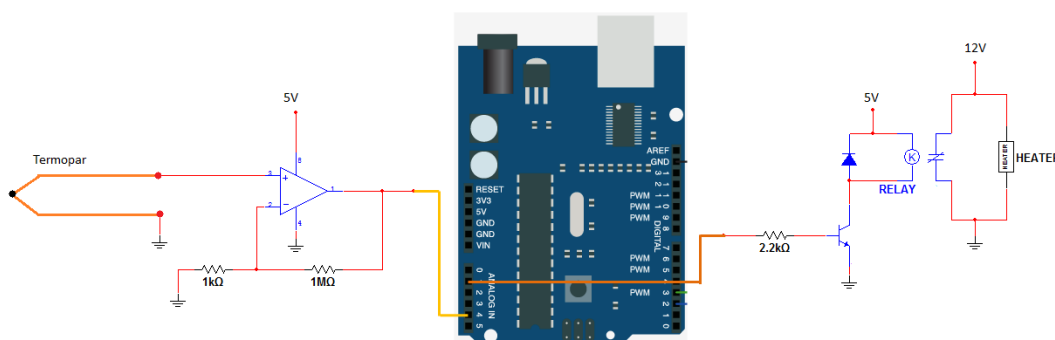


Figura 23 – Sistema de controlo da temperatura. O sinal elétrico do termopar é amplificado e medido no Arduino que vai controlar a ativação do relé, alimentando a resistência a 12 V.

O pino do Arduino que controla a ativação (quando HIGH) ou desativação (quando LOW) do relé é o pino analógico A1 definido como digital (número 15). A resistência de aquecimento foi feita utilizando um filamento elétrico resistivo com uma resistência por unidade de comprimento de $5,58 \Omega/\text{m}$. O comprimento do filamento é 78 cm e a sua resistência $4,4 \Omega$. A alimentação da resistência é feita com uma tensão de 12 V em que o relé funciona como interruptor. Assim, a corrente que passará na resistência será de 2,7 A. O conector e o cabo de alimentação da resistência foram retirados de uma impressora. Uma das extremidades do cabo liga ao conector no painel, e a outra, que está descarnada e liga à resistência através um ligador.

3.6.6. Sistema de sucção

O sistema de sucção conta com uma pequena bomba de sucção, um tubo de silicone, um tubo metálico, e uma ventosa. Para fazer vácuo, e desta forma agarrar o vidro de encapsulamento, é necessário que a bomba esteja ligada para que o ar entre pelo lado da ventosa. Tal como para a resistência de aquecimento, é necessário utilizar um relé para fazer a ativação e desativação da bomba que é alimentada a 12 V (figura 24). O pino do Arduino que controla este relé é o A2 definido como digital (número 16). A conexão entre a caixa e o sistema é feita pelo último terminal da ficha série que leva os 12 V a um dos terminais do motor, o outro terminal está ligado à terra.

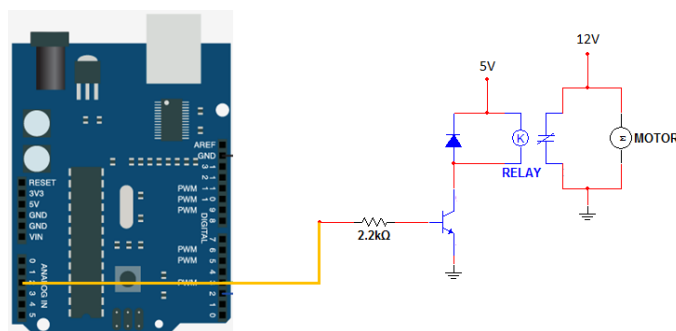


Figura 24 – Circuito esquemático do controlo do relé que alimenta o motor DC da bomba.

3.6.7. Sistema de controlo à distância (Router wireless)

O modelo do *router* utilizado para fazer a comunicação entre o computador e o Arduino foi o TP-LINK WR842ND. Este *router* possui uma porta USB do tipo A, que originalmente, serve para ligar a impressoras ou unidades de armazenamento, e controlar estes dispositivos pela rede. Como já foi dito, também se vai fazer o controlo manual da mesa micrométrica com a ajuda de uma *webcam*, que conta igualmente com uma ligação USB. Assim, para que ambos os dispositivos funcionem simultaneamente no *router*, é necessária a utilização de uma extensão de portas USB que se liga ao *router*. Através do *firmware* original do *router* não é possível fazer o controlo destes dispositivos, pois apenas está programado para impressoras e *pens*, e não é possível alterá-lo. Assim, foi necessário alterar o *firmware*, para um que permita mais flexibilidade e que consiga controlar diversos dispositivos através dos seus próprios *softwares* de controlo. O *firmware* escolhido foi o openWRT, um *firmware* baseado em Linux que permite o controlo dos dispositivos que se pretendem utilizar. Depois de configurar devidamente o *router* através do novo *firmware*, foi possível então controlar o

Arduino e a *webcam*. A comunicação entre o computador e o Arduino é feita através de uma porta série virtual. Na realidade, é através de um endereço de *ip*.

3.7. Tabela de custos

Os custos dos materiais necessários para a realização deste trabalho estão discriminados na tabela 4. Pela reutilização e reciclagem de materiais fez-se uma estimativa da poupança que se obteve na construção do sistema.

Tabela 4 – Tabela de custos de mercado (valores sem IVA) do material usado e custo efetivo para este protótipo devido à reutilização e reciclagem de materiais e equipamentos.

Produto	Quantidade	Valor unitário de mercado	Total de mercado	Total gasto
EasyDriver	3	9,66	28,99	28,99
Arduino UNO	1	16,94	16,94	16,94
Big EasyDriver	1	18,94	18,94	18,94
Relé 2 circuitos Bobine 5V	2	5,21	10,42	10,42
Bomba de sucção	1	15,15	15,15	15,15
Torno de relojoeiro	1	5,39	5,39	5,39
Micro-interruptores	7	0,77	5,39	5,39
Cardan alumínio (4x4mm)	2	18,94	37,88	37,88
Cardan aço (3x3mm)	2	34,66	69,33	69,33
Ventosa	1	2,30	2,30	2,30
Router	1	19,25	19,25	19,25
Conectores de painel	4	0,88	3,54	3,54
Fonte de Alimentação	1	38,50	38,50	0
Motores passo-a-passo	4	61,60	246,40	0
Webcam	1	7,70	7,70	0
Veio retificado	4	19,25	77,00	0
Veio roscado	4	11,55	46,20	0
Guias de veio retificado	4	23,10	92,40	0
Porca para veio roscado	4	5,39	21,56	0
Suporte para veios retificados	8	9,24	73,92	0
LASER	1	3,08	3,08	0
Fotoresistência	1	1,54	1,54	0
Termopar	1	3,85	3,85	0
TOTAIS			845,67	233,52

Sem reutilização de materiais o custo total do projeto seria €845,67, no entanto só se gastou €233,52, ou seja, uma poupança de 72,4%.

4. Programação do sistema

O sistema é controlado pela programação em computador nos *softwares* Matlab e Arduino IDE. De uma forma geral, as funções que gerarão os movimentos dos motores, controlo de sensores e dos relés são criadas e carregadas pelo programa do Arduino no microprocessador *Atmel*. O controlo do sistema por parte do utilizador é realizado no Matlab. É a partir do Matlab que são definidos os parâmetros de controlo como: a distância a percorrer em cada atuador linear, a sua velocidade, a ativação e duração da alimentação da resistência de aquecimento, etc. Estes parâmetros são enviados por porta série para o Arduino. Desta forma, o Arduino espera pelos valores que o Matlab lhe enviará para que o funcionamento do sistema inicie.

4.1. Arduino IDE

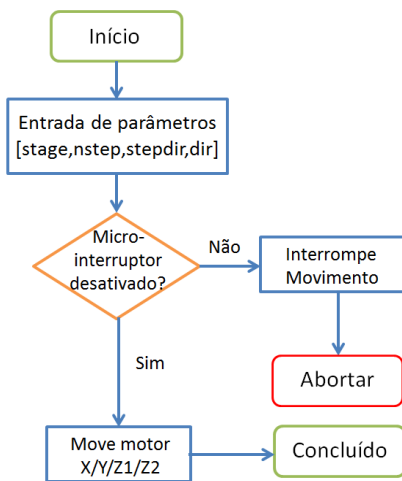
No programa do Arduino são definidos onze casos que executam funções que permitem o controlo do sistema:

1. Função de controlo do movimento do motor X;
2. Função de controlo do movimento do motor Y;
3. Função de controlo do movimento do motor Z1 (deposição de *epoxy*);
4. Função de controlo do movimento do motor Z2 (colocação do encapsulamento);
5. Função de controlo do posicionamento do OLED;
6. Função de controlo da ativação/desativação da resistência de aquecimento;
7. Função de retorno às posições iniciais dos atuadores;
8. Função que ativa a bomba de sucção;
9. Função que desativa a bomba de sucção;
10. Função de movimento simultâneo X e Z1;
11. Função de movimento simultâneo Y e Z1;

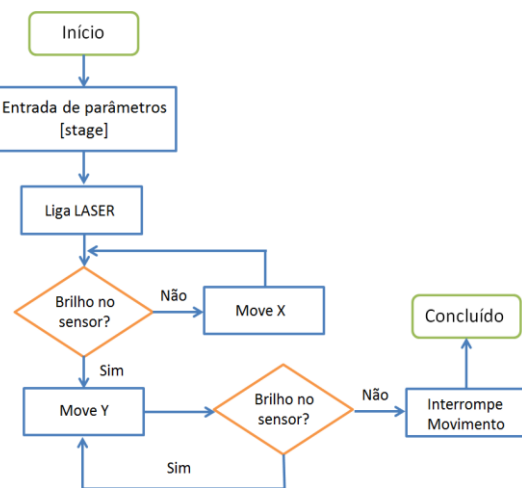
Para executar diferentes porções de código de cada vez, ou seja, controlar funções separadamente, utiliza-se a declaração *switch/case*. Em cada *case* é executada uma ou várias funções de controlo. De uma forma geral, o controlo de cada estágio é dado pela declaração de funções usando o comando *void*. Por exemplo, para os movimentos (casos de 1 a 4), um *void* contém a rotina que gera o movimento do motor e o respetivo controlo de micro-interruptores. Esta rotina espera que o Matlab envie o número de passos, o intervalo de tempo entre passos e o sentido de rotação do motor para ser executada. O caso 5 faz o posicionamento do OLED, desta forma, consegue-se saber qual a sua posição com precisão. A execução deste caso apenas necessita do envio do número do estágio. O caso 6 corresponde à ativação ou desativação da resistência de aquecimento. O seu parâmetro de entrada é o tempo que dura o aquecimento. Durante este tempo, será medida a temperatura próximo do OLED a cada segundo, se a temperatura for superior à pretendida, a resistência desliga e vice-versa. O caso 7 leva todos os atuadores às suas posições iniciais utilizando os micro-interruptores como referência. O parâmetro de entrada é unicamente o caso a executar, e os

atuadores vão-se mover um de cada vez até encontrar a sua posição de referência. Os casos 8 e 9 correspondem à ativação e desativação da bomba de sucção, respetivamente. Os casos 10 e 11 provocam o movimento simultâneo entre X/Y e o atuador Z1 de acordo com os parâmetros de entrada: a distância a percorrer pelos atuadores X/Y, a razão de movimento de Z1 relativamente a X/Y e a velocidade dos atuadores X/Y (intervalo entre passos) e a direção de X/Y. Incluiu-se ainda um parâmetro que permite corrigir eventuais desalinhamentos existentes no movimento da mesa XY. Assim, durante a deposição de *epoxy*, este desalinhamento é corrigido por um movimento de compensação: se o movimento for em X, tem que se mover Y em simultâneo para corrigir, e vice-versa. Para tal, teve que se adicionar mais um parâmetro, a direção do desalinhamento. Na figura 25 apresentam-se os fluxogramas da programação do microprocessador.

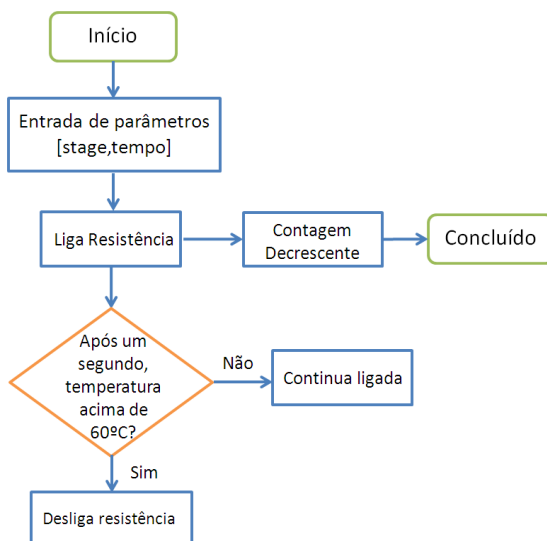
a) Move motores



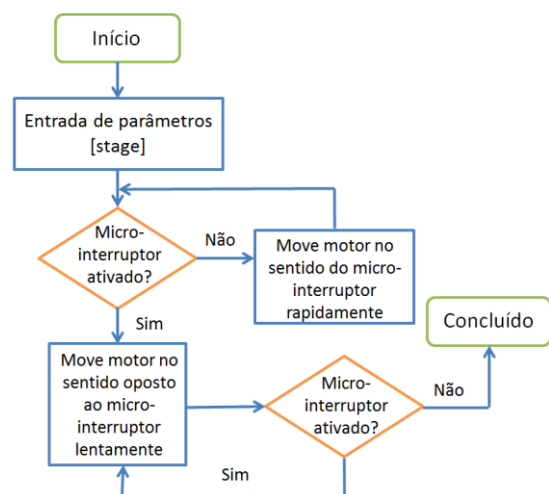
b) Posicionamento do OLED



c) Estágio de aquecimento



d) Regresso às posições iniciais



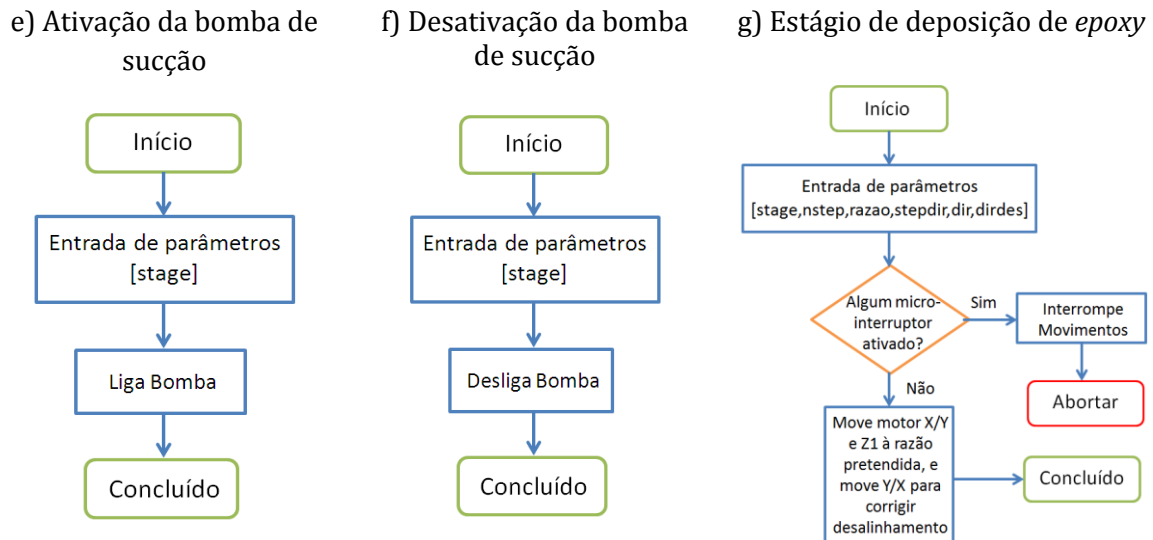


Figura 25 - Fluxograma da programação dos casos no Arduino. a) Fluxograma relativo aos primeiros quatro casos (movimentação de motores). b) Encontra a posição do OLED. c) Ativação da resistência e controlo de temperatura. d) Regresso às posições iniciais. e) Ativa bomba de sucção. f) Desativa bomba de sucção. g) Corresponde aos últimos dois casos para deposição de *epoxy*.

4.2. Controlo e Interface de utilizador (Matlab)

No Matlab a programação é direccionada não para o envio de funções para o Arduino mas para o fluxo do envio de valores que irão executar as funções já programadas nele. A comunicação entre o Matlab e o Arduino é realizada por porta série. Foram criadas diversas funções e rotinas necessárias ao controlo do sistema: uma função que inicia a porta série do Arduino no Matlab sendo possível a comunicação com o mesmo; uma função de cálculo que permite ao utilizador introduzir os valores da distância (em milímetros) e de velocidade (em milímetros por segundo) a percorrer pelos motores, retornando os valores que o Arduino deve processar que são: o número de passos (pulsos elétricos), o atraso entre passos (define o período dos pulsos), e a direção do movimento; e uma outra função que envia os valores por porta série para o Arduino. As rotinas são definidas para a execução destas funções.

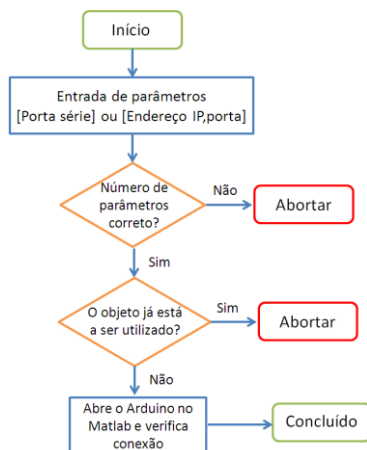
As funções que iniciam o Arduino no Matlab são: a “*startarduino*” quando a comunicação for USB e “*startarduinowifi*” quando for sem fios. Esta função tem como parâmetro de entrada a porta série, quando conectado por USB (COM) ou o endereço IP e porta quando conectado por *wireless* (TCPIP:porta). Dentro desta função são executadas outras funções da biblioteca do Matlab e aí descritas. No caso *wireless* cria-se o objeto através da função do Matlab “*tcpip*”, como parâmetro de entrada o IP (ex: 192.168.1.1) e a porta (ex: 1234).

A função de cálculo “*calc2ard*” para controlo de motores tem como parâmetros de entrada o número do caso que queremos executar no Arduino, a distância em milímetros (definindo este valor positivo ou negativo consoante a direção pretendida), e a velocidade em milímetros por segundo. Esta função faz o cálculo dos parâmetros necessários ao processamento por parte do Arduino para cada motor. Como cada motor corresponde a um caso no Arduino devendo-se definir qual o caso a executar nesta função, a partir daqui, a função “*calc2ard*” vai fazer os cálculos apenas para esse motor, pelo que o número de passos por volta pode ser diferente para diferentes motores ou controladores. Esta função ainda

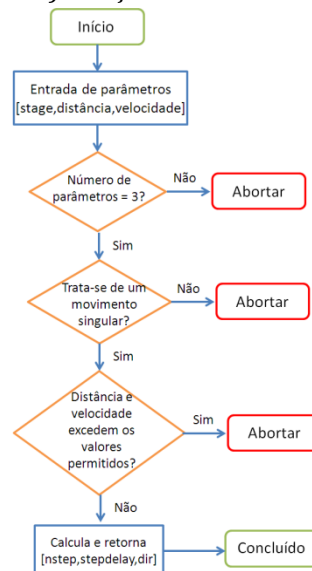
limita a distância máxima que podemos percorrer em cada atuador e a velocidade máxima, pelo que se o utilizador o exceder, o envio de valores para o Arduino não será concluído e uma mensagem de erro aparecerá.

A função “*send2ard*” faz o envio dos valores necessários para a execução de cada estágio. Os parâmetros de entrada desta função são: o caso que queremos executar, seguido da matriz de parâmetros correspondentes. Por exemplo, se for para motores, os parâmetros serão o número de passos (*nstep*), o atraso entre passos (*stepdelay*) e a direção (*stepdir*); para a resistência de aquecimento, será o estado (ligada ou desligada) e a duração; para o retorno às posições iniciais é só necessário colocar o caso pretendido. Nesta função é então criada a *string* a enviar para o Arduino usando a função da biblioteca do Matlab, “*fprintf*”, cujo parâmetro de entrada é o objeto do Arduino e a *string* e espera-se a resposta do Arduino usando a função “*fscanf*” com parâmetro de entrada a porta série. Por fim, uma rotina “*main_v0*” executa a função “*send2ard*”. Na figura 26 apresentam-se os fluxogramas das funções e rotina.

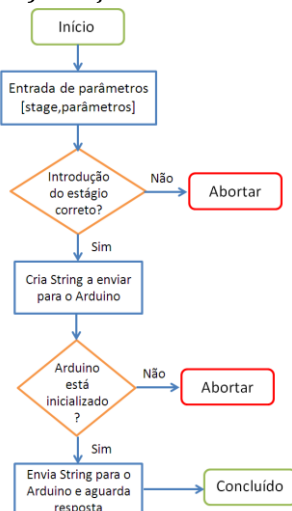
a) Funções “*startarduino*” “*startarduinowifi*”



b) Função “*calc2ard*”



c) Função “*send2ard*”



d) Rotina “*main_v0*”

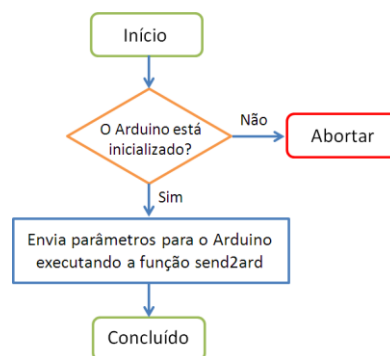


Figura 26 – Fluxogramas das funções e rotinas desenvolvidas em Matlab. a) funções que iniciam o Arduino no Matlab, com e sem fios. b) função de cálculo para motores, convertendo distância e velocidade para os parâmetros que o Arduino processa. c) função que envia comandos para o Arduino. d) rotina que executa “send2ard”.

Para facilitar a realização do encapsulamento por parte do utilizador, foi elaborada uma aplicação em ambiente gráfico que executa os casos necessários usando os parâmetros inseridos pelo operador (figura 27a). O GUI criado é constituído por botões que executam sequências de processos. Existem duas hipóteses de comunicação entre o Matlab e o Arduino, por cabo, ou sem fios. No GUI estão introduzidos dois botões que ligam o Arduino da forma pretendida, ou por USB ou por *wireless*. Antes de premir o botão, o utilizador deve primeiro introduzir a porta série do Arduino no caso USB, ou o endereço IP e a porta no caso *wireless*. O botão <Desliga Arduino> desconecta o Arduino do Matlab, seja por USB ou TCPIP. O botão <GoHome> executa o caso 7 do Arduino, ou seja, aqueles que retorna os atuadores às posições iniciais. O botão <Encontra OLED> faz o posicionamento do OLED relativamente à ponta de deposição de *epoxy*, executando o caso de posicionamento (caso 5) e movimentos auxiliares X/Y (casos 1 e 2). O botão <Deposição EPOXY> executará os movimentos para a formação do retângulo de *epoxy*, contando essencialmente com a utilização dos casos 10 e 11 do Arduino e do movimento singular de Z1 (caso 3). Antes de premir este botão, deve-se colocar a razão de movimento e a velocidade dos atuadores X e Y. O botão <Coloca Vidro-Aquecimento> será responsável por uma sequência de processos que originarão a colocação do encapsulamento por cima do OLED utilizando o atuador Z2 (caso 4) e ativará o estágio de aquecimento (caso 6). O sistema alinhará o centro do OLED com o centro do encapsulamento (casos 1 e 2), a bomba de sucção será ativada e desativada alternadamente (casos 8 e 9) para agarrar o vidro do suporte construído na base da mesa XY. O tempo de aquecimento deve ser colocado antes de premir o botão e pode ser monitorizado pelo utilizador pela contagem decrescente. No final deste processo, pode-se premir o botão <Retira OLED> que vai levar o OLED a uma posição na mesa XY para ser retirado facilmente de forma manual. A imagem da *webcam* (figura 27b) é visualizada numa janela à parte, utilizando qualquer aplicação “*media player*” que o permita.

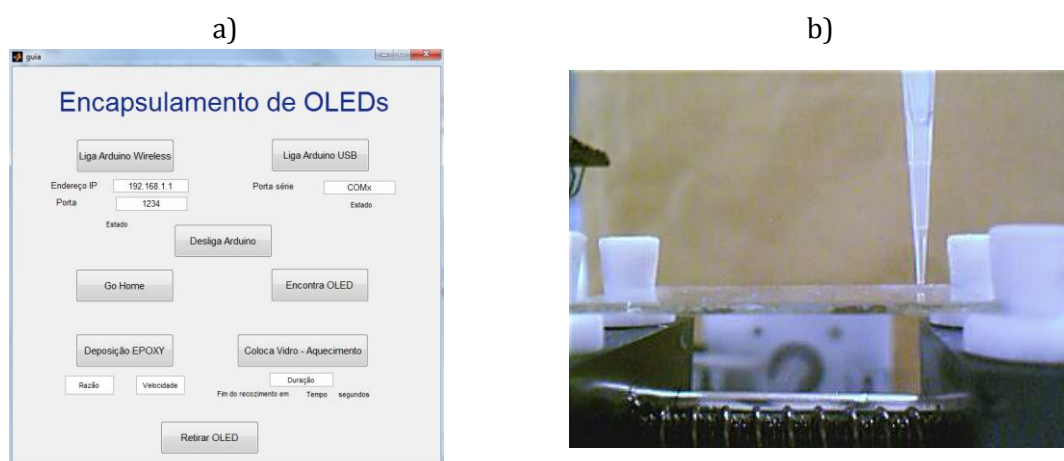


Figura 27 – a) Guia de encapsulamento de OLEDs. b) Imagem da *webcam* para visualização da altura da ponta em relação ao substrato.

5. Ensaios ao protótipo

5.1. Processo de encapsulamento

O processo de encapsulamento desenvolve-se em cinco etapas que são ordenadas pelo utilizador usando os botões do GUI desenvolvido no Matlab. Estas cinco etapas são definidas como: o regresso às posições iniciais, o processo de encontrar uma posição de referência do OLED, deposição de *epoxy*, colocação do vidro e aquecimento e retirar o OLED encapsulado. O OLED deve ser colocado e fixo no torno com as pistas de alumínio paralelas ao movimento do atuador Y.

Detalhadamente, o processo desenrola-se da seguinte forma:

1. Clicando no botão <GoHome>, o sistema retorna às posições de referência em cada atuador, um de cada vez.
 - 1.1. A uma velocidade rápida, cada motor provoca o movimento do atuador até este acionar o micro-interruptor.
 - 1.2. Move-se no sentido contrário a uma velocidade mais lenta até desativar o micro-interruptor. Estando esta etapa concluída, podemos clicar no botão <Encontra OLED>.
2. O botão <Encontra OLED> vai procurar a posição de referência do OLED:
 - 2.1. Move o atuador Y para uma posição média relativamente ao feixe laser. Como a posição do OLED no torno não vai variar muito, é apenas necessário que se garanta que as pistas de alumínio vão encontrar o feixe do laser.
 - 2.2. Move o atuador X, ligando o laser entretanto.
 - 2.3. Quando o feixe do laser incidir na pista de alumínio, o feixe refletido incide com elevada intensidade na fotoresistência, e neste momento, temos a posição X do OLED encontrada.
 - 2.4. Ainda com o laser ligado, vai-se processar o movimento Y até que a intensidade medida no sensor reduza. Neste momento, o movimento é interrompido e a posição do OLED está encontrada.
 - 2.5. Move X e Y até que se alinhe com a ponta volumétrica esteja na posição adequada para dar início à deposição de *epoxy*.
3. Para a deposição de *epoxy*, o utilizador deve colocar a agulha da ponta volumétrica quase em contacto com o OLED, regulando a mesa micrométrica manualmente e visualizando a imagem da zona em tempo real produzida pela *webcam*.
 - 3.1. Inicia-se o processo movendo o êmbolo da seringa para exercer pressão na *epoxy*.
 - 3.2. Move X e Z1 depositando a primeira linha de *epoxy*;
 - 3.3. Move Y e Z1
 - 3.4. Move X no sentido oposto a 3.2 e Z1
 - 3.5. Move Y no sentido oposto a 3.3 e Z1.
 - 3.6. Obtém-se um retângulo de *epoxy* sobre o substrato do OLED como mostra a figura 28.

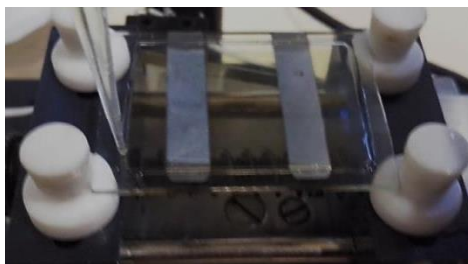


Figura 28 – Estágio de deposição de *epoxy*.

4. O botão <Coloca Vidro-Aquecimento> processa os seguintes passos:
 - 4.1. Move X o suficiente para que o atuador Z2 não colida com a plataforma.
 - 4.2. Move Z2 até que a ventosa pressione o vidro de encapsulamento, entretanto, a bomba de sucção é ligada para fazer sucção;
 - 4.3. Move Z2 no sentido contrário ainda com a bomba ligada, neste momento o vidro está fixo à ventosa. Entretanto, a bomba é alternadamente ligada e desligada por forma a garantir que o vidro não cai.
 - 4.4. Quando o atuador Z2 está numa posição elevada, a mesa XY vai-se encarregar de levar o OLED para debaixo no vidro.
 - 4.5. Depois de o OLED estar centrado por baixo do vidro de encapsulamento, o atuador Z2 move-se até atingir a *epoxy*, sem exercer demasiada pressão, apenas encostar.
 - 4.6. Por fim a resistência de aquecimento é ligada e a temperatura é controlada através da medição utilizando o termopar e o circuito de amplificação. A temperatura na *epoxy* serão 60 °C, durante 15 minutos.
 - 4.7. O OLED está encapsulado.
5. O botão Retira OLED permite ao utilizador retirar o OLED para uma posição favorável ao seu manuseamento:
 - 5.1. O atuador Z2 sobe.
 - 5.2. Move X e Y para uma posição favorável.
 - 5.3. O utilizador pode retirar o OLED encapsulado.

5.2. Testes de deposição de *epoxy*

De todos os estágios de encapsulamento, a deposição de *epoxy* é o mais delicado. Existem diversas variáveis que dificultam uma deposição correta da resina. Desta forma, foram realizados inúmeros testes que foram permitindo verificar qual a melhor forma e método de deposição, através de tentativa e erro, até obter linhas de *epoxy* pelos limites do substrato do OLED suficientemente estreitas, contínuas e com as dimensões ideais por forma a que, aquando da colocação do encapsulamento de vidro, a vedação seja total sem que a *epoxy* entre em contacto com as áreas ativas do OLED, o que levaria à destruição do dispositivo. Com este método a funcionar corretamente, não será necessária a utilização de espaçadores entre o substrato com as camadas depositadas e o vidro de encapsulamento.

5.2.1. Procedimento de preparação de *epoxy*

A *epoxy* é fabricada através da mistura de dois reagentes, uma parte A e uma parte B. A razão de quantidades entre a parte A e a parte B é de 1,7:1. Utilizando uma seringa para cada uma das partes, retiram-se as quantidades necessárias para a realização de um ou mais encapsulamentos. A *epoxy* foi preparada utilizando 0,85 ml da parte A e 0,5 ml da parte B, perfazendo um volume total de 1,35 ml. A mistura é feita dentro de um frasco e colocado num agitador magnético durante 5 minutos. Depois, a *epoxy* é colocada numa ponta volumétrica com um diâmetro de abertura de 0,8 mm. Tal quantidade cabe dentro das pontas volumétricas descartáveis e revelou-se suficiente para encapsular cerca de 10 OLEDs. De realçar que mesmo à temperatura ambiente a *epoxy* está a curar pelo que ao fim de 2 horas depois de preparada deve ser substituída por outra quantidade preparada de fresco, sendo necessário esperar 1 hora antes de reiniciar o processo de encapsulamento. Esta desvantagem pode ser minorada, permitindo utilizar a mesma quantidade de *epoxy* por mais tempo ajustando a razão de movimento de Z1 relativamente a X/Y. Este ajuste pode ser feito pelo operador no menu de controlo do sistema. Assim, e considerando a quantidade de OLEDs que é possível encapsular com a mesma pipeta volumétrica e o tempo de deposição de cada OLEDs será sensato utilizar pequenas quantidades de *epoxy* (no máximo 1 ml) em cada pipeta.

Depois de se colocar a *epoxy* na ponta volumétrica e de a fixar ao sistema de deposição, o primeiro problema surge. A *epoxy* escorre pela abertura da ponta, pingando constantemente. Desta forma, perde-se parte do controlo da deposição. Por forma a resolver este problema foi feito um teste do número de gotas que caem em função do tempo. Com o passar do tempo a viscosidade da *epoxy* vai aumentando, até que endurece totalmente, desta forma, o período entre gotas deve aumentar ao longo do tempo. Então, o objetivo desta experiência é verificar a partir de quanto tempo, depois de feita a *epoxy*, deixa de escorrer ou o período entre pingos é suficientemente elevado para permitir o início do processo de encapsulamento, mas garantindo que ainda é fluída o suficiente para ser depositada. O resultado gráfico do número de pingos em função do tempo em minutos apresenta-se na figura 29.

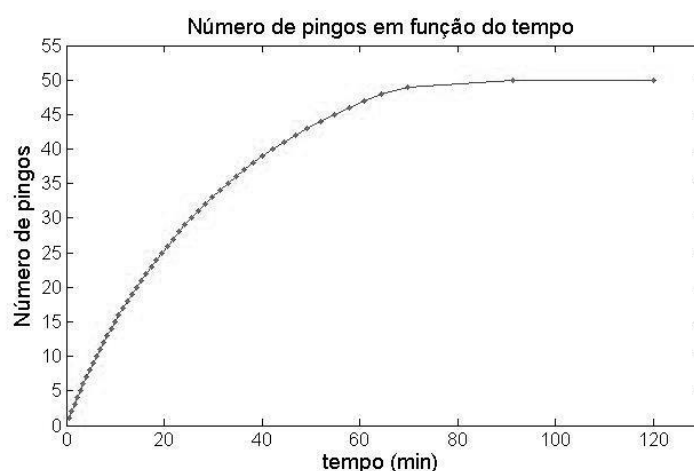


Figura 29 – Gráfico do número de gotas que caíram em função do tempo decorrido.

A partir de cerca de uma hora depois de fazer a *epoxy*, o período entre pingos já é bastante alargado. Depois da gota que caiu aos 70 minutos, outra só caiu novamente cerca de 20 minutos depois, e posteriormente não se verificou a queda de mais até aos 120 minutos. Desta forma, dever-se-á realizar o encapsulamento cerca de uma hora depois de fabricar a *epoxy*. Estes valores de tempos variarão certamente com a temperatura ambiente, pelo que se recomenda a realização de um teste semelhante a este previamente á utilização do sistema nas condições em que será utilizado (inverno, verão, existência ou não de ar condicionado no laboratório, etc).

Os testes de deposição de *epoxy* foram realizados em lamelas de vidro, fazendo variar diferentes parâmetros. Neste estágio de encapsulamento, a mesa XY move-se ao mesmo tempo que o atuador que empurra o êmbolo da seringa. Como não foi possível movimentar dois ou mais atuadores ao mesmo tempo pela programação, faz-se um movimento alternado tão rápido que não permite distinguir os dois movimentos independentes. Por exemplo, se se quiser que o atuador X se mova cinco vezes mais que o Z1, envia-se para o Arduino uma instrução com uma razão de cinco, que fará mover o atuador X, cinco micropassos e o Z1, um micropasso, alternadamente, até à distância que se pretende percorrer. Os testes realizados contam com a variação da razão de deslocamento entre os atuadores da mesa XY e o atuador da seringa, e a velocidade. A altura da deposição é sempre a mesma, com a ponta praticamente em contacto com o substrato, como se estivessemos a escrever sobre ele. Por isso, a colocação da *webcam* é importante para ajustar e verificar a correta posição da ponta.

5.2.2. Testes de deposição de linhas de *epoxy*

Verificou-se que usar a mesma razão de deslocamento entre os atuadores em todo o processo de deposição induz um aumento da largura da linha ao longo do processo, consequência do aumento de fluxo de *epoxy* devido ao aumento da pressão exercida com a compressão do gás dentro do êmbolo. Desta forma, é necessário ir reduzindo o deslocamento do êmbolo da seringa ao longo da deposição para equilibrar a pressão. Para corrigir esta situação efetuaram-se ensaios, de deposição de quatro linhas como mostra a figura 30, alterando a razão de deslocamento de 5 em 5 e variando a velocidade e a razão inicial. A finalidade destes testes é medir a largura e a altura das linhas e encontrar as condições ideais: linhas o mais finas possível e contínuas. O processo inicia-se com um pequeno movimento inicial do êmbolo da seringa para garantir que antes de iniciar o movimento já o gás está minimamente comprimido (o equivalente a tirar a folga a um sistema mecânico). O comprimento depositado de cada uma das quatro linhas é de 27 mm, simulando as condições de deposição de um retângulo que será usado durante o encapsulamento. Os resultados da figura 31 representam a largura e a altura de cada linha, medidas no ponto central, em função da razão inicial para cada velocidade.



Figura 30 – Exemplo de um teste de deposição das quatro linhas de *epoxy* num substrato de vidro.

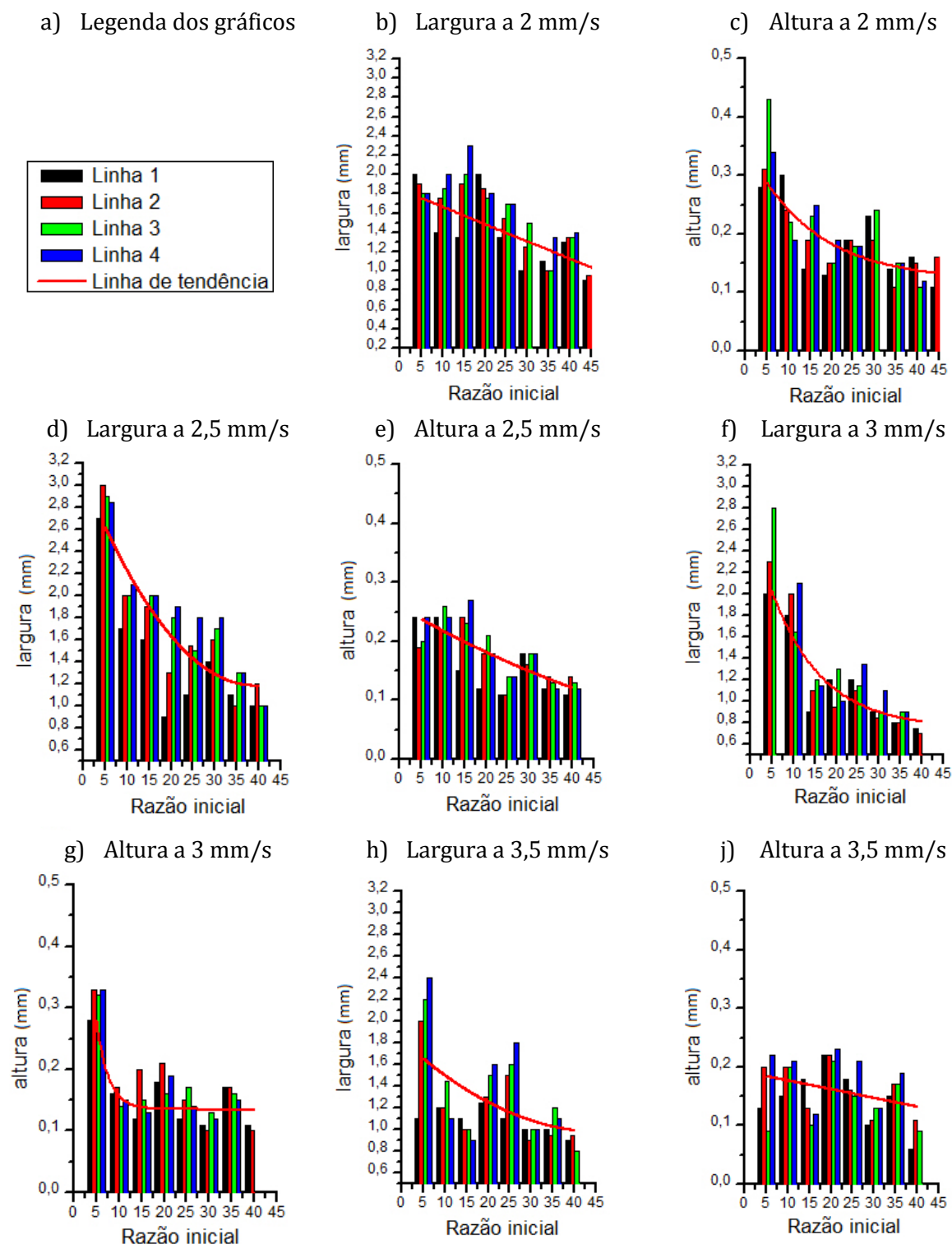


Figura 31 – Resultados gráficos dos testes de deposição de linhas de *epoxy*.

De uma forma geral a tendência dos resultados apresentados mostra, como esperado, que a largura e altura diminuem com a razão inicial utilizada. Um dos objetivos desta análise foi comparar quanto os parâmetros de cada conjunto de quatro linhas se mantêm constantes para a mesma razão inicial, significando que a pressão está equilibrada ao longo da deposição das quatro linhas. Estes resultados permitem concluir que geralmente as diferenças máximas

para a altura são da ordem dos 100 μm e para as larguras da ordem dos 200 μm sendo as maiores diferenças para as razões de deposição mais baixas e entre a primeira linha e as restantes que por vezes apresentam uma diferença máxima superior, significando que para razões mais baixas, a pressão está menos equilibrada.

Perante estes resultados optou-se pela realização dos ensaios de encapsulamento utilizando razões iniciais e velocidades descritas na tabela 5. Cada linha de *epoxy* é depositada com uma razão diferente, num incremento de 5. Por exemplo, começando com uma razão de 35, vai-se depositar a primeira linha de *epoxy* em X, de seguida, com uma razão de 40, faz-se a segunda linha em Y, seguido de 45 em X e 50 em Y, finalizando o retângulo de *epoxy*.

5.3. Testes de encapsulamento

Por fim, foram realizados testes de encapsulamento utilizando OLEDs já degradados. A partir dos resultados dos testes de deposição de linhas de *epoxy*, utilizaram-se as condições de deposição que permitiam a criação de linhas finas e contínuas. A *epoxy* não pode entrar em contacto com a área ativa do OLED e como estamos a colocar o vidro de encapsulamento por cima do substrato, é de esperar que a *epoxy* se espalhe dentro do encapsulamento, correndo-se o risco de a *epoxy* atingir as áreas ativas. Desta forma, é necessário criar o retângulo de *epoxy* praticamente com as mesmas dimensões do encapsulamento, para que não alastre muito para dentro do encapsulamento, devido à pressão exercida. Neste processo, é importante ter uma boa precisão de posicionamento, para que a *epoxy* seja depositada nas dimensões corretas e o encapsulamento seja colocado praticamente sem pressionar e na posição correta. A área do encapsulamento tem que ser menor que a do OLED, para que seja possível fazer as ligações elétricas aos elétrodos. O encapsulamento de vidro tem forma de retângulo com 35 mm de comprimento e 26 mm de largura, para ser colocado no centro do OLED com dimensões 40x30 mm, sobrando cerca de 2 mm para cada elétrodo como mostra a figura 32. Assim, o retângulo de *epoxy* terá 34 mm de comprimento e 25 mm de largura.



Figura 32 – Exemplo de um OLED bem encapsulado. a) visão global e b) detalhe do canto inferior esquerdo. A zona mais transparente indicada a vermelho corresponde à zona do OLED com *epoxy* de selagem.

Tendo em conta os resultados obtidos na deposição das linhas de *epoxy* foram usadas as duas últimas razões iniciais que ainda formavam todas as linhas, para cada velocidade, para realizar vários testes de encapsulamento:

Tabela 5 – Parâmetros de deposição de *epoxy* para testes de encapsulamento

Velocidade (mm/s)	Razão inicial	Teste
2	45	1
	50	2
2,5	35	3
	40	4
3	30	5
	35	6
3,5	30	7
	35	8

Estes testes de encapsulamento permitem verificar qualitativamente se o encapsulamento está bem conseguido ou não. Considera-se que o encapsulamento é correto quando se observar que todos os limites do encapsulamento estão preenchidos de *epoxy* e que a *epoxy* não se alastrou demasiado atingindo as áreas ativas. As fotografias dos testes de encapsulamento mostram a qualidade do mesmo. Observa-se a mancha de *epoxy* ao longo dos limites do encapsulamento onde é possível verificar se vedou todos os limites do encapsulamento ao substrato e não alastrou às áreas ativas.

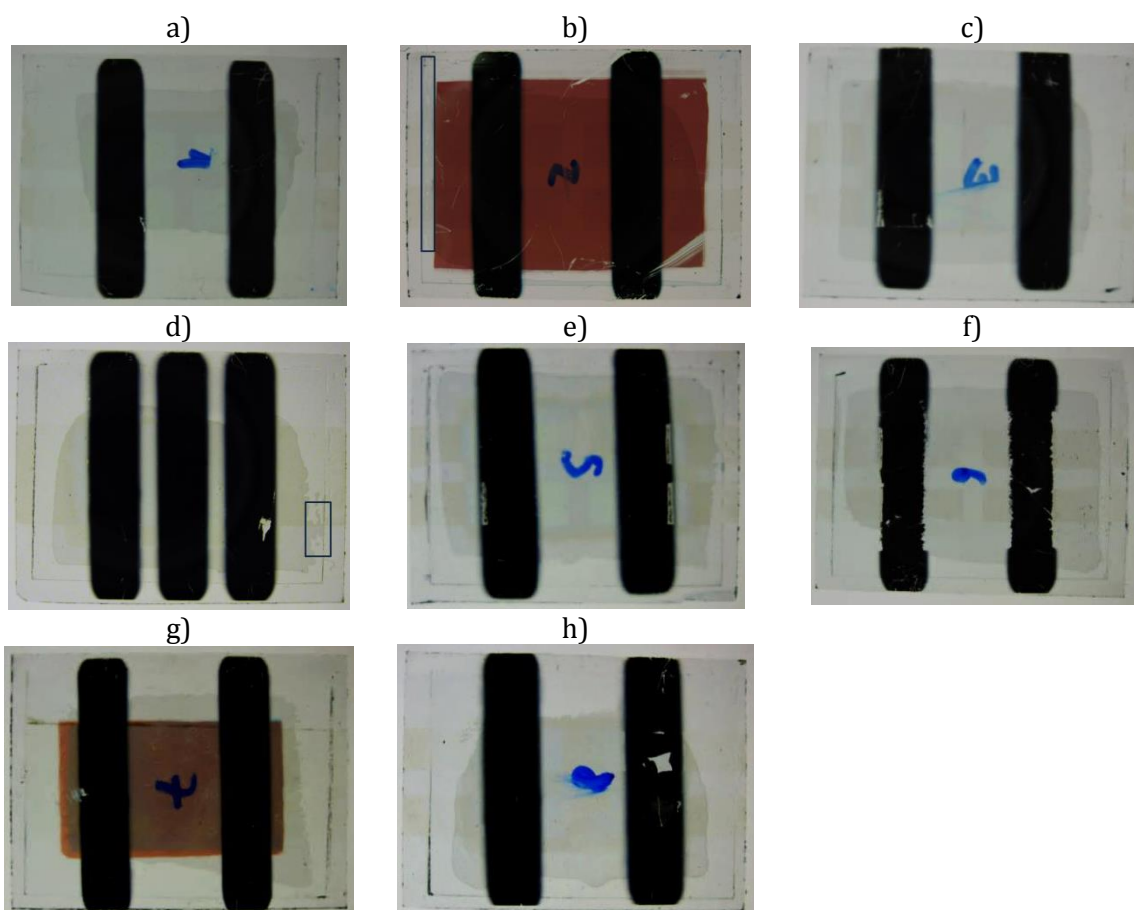


Figura 33 – Fotografias dos testes de encapsulamento a OLEDs para as condições referidas anteriormente. Nas figuras b) e d) estão assinaladas as zonas em que a *epoxy* não vedou totalmente o encapsulamento.

Os resultados dos testes que foram realizados a uma velocidade de 2 mm/s mostram que com a razão inicial de 45, a *epoxy* vedou todos os limites mas alastrou-se demasiado

atingindo uma pequena parte de uma das áreas ativas (figura 33a). No segundo caso (b) verifica-se um mau encapsulamento visto que uma das arestas não foi devidamente vedada. No terceiro caso, a uma velocidade de 2,5 mm/s e razão inicial de 35 verifica-se um bom encapsulamento, pois vedou bem em todos os limites e não alastrou às áreas ativas (c). O mesmo não aconteceu para a razão de 40 que não vedou totalmente numa das arestas (d). Os melhores encapsulamentos conseguiram-se para a velocidade de 3 mm/s para ambas as razões iniciais (e-f). Tanto num como no outro conseguiu-se uma vedação total mas o melhor caso é aquele que mantém a maior distância às camadas ativas (e). Para a razão de 3,5 mm/s a *epoxy* alastrou-se mais que na de 3 mm/s, no entanto não chega a entrar em contacto com as áreas ativas (g-h).

Os resultados que estão menos bons podem-se dever à formação de gota na abertura da ponta volumétrica que vai originar a deposição de um volume superior na primeira linha alastrando-se mais, tal como sugerem os resultados (f-h). As falhas na vedação observadas em (b) e (d) podem-se dever à formação de bolhas de ar que impedem a vedação total.

Os encapsulamentos foram realizados sem exercer pressão do vidro no OLED. O posicionamento da altura do vidro em relação ao OLED foi encontrado por tentativa e erro. O vidro entra em contacto com a *epoxy* e é “puxado” pela sua tensão superficial, desta forma não é exercida pressão por parte do atuador.

5.4. Testes de temperatura

O sensor de temperatura para medir a temperatura na posição do OLED foi calibrado num forno cuja temperatura foi medida com recurso a um termómetro digital com precisão de 0,1 °C. A ponta do termopar e do termómetro foram colocadas dentro do forno, próximas uma da outra. Os valores de tensão (medida num multímetro) e temperatura foram registados consoante a subida da temperatura dentro do forno, que foi feita de forma lenta (dos 30 °C aos 82 °C numa hora, aproximadamente). Na figura 34 apresenta-se o resultado gráfico.

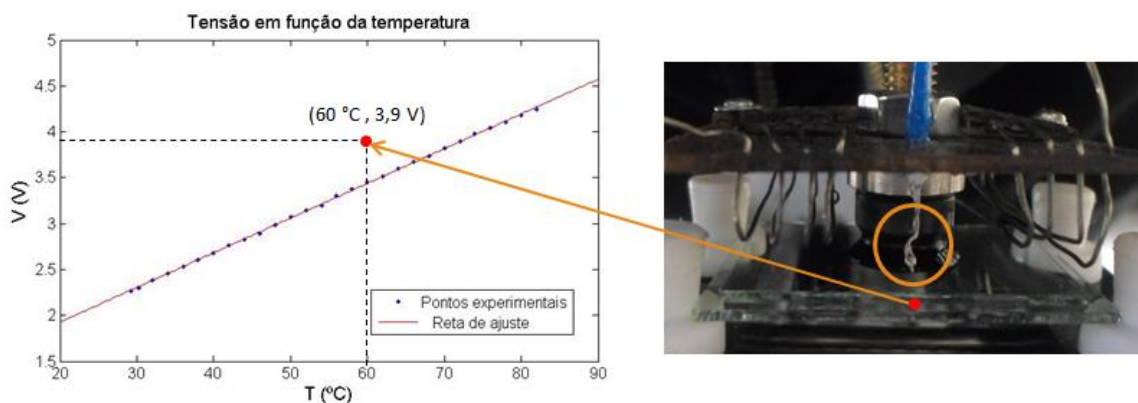


Figura 34 - Calibração do sistema de medição de temperatura. A reta de calibração tem equação $y = (3,776 \pm 0,029) \cdot 10^{-2} x + (1,171 \pm 0,017) \text{ V}$, e uma correlação de 0,9996. A ponta do termopar do sistema está afastada da zona da *epoxy* medindo uma temperatura superior. Recalibrou-se a resposta do sistema para uma temperatura de 60 °C na zona da *epoxy*, medindo-se 3,9 V pelo sistema.

Verifica-se uma relação linear com boa correlação. Através da equação obtida do ajuste aos pontos experimentais, é possível fazer o controlo da temperatura através da tensão medida no Arduino e desta forma, controlar a ativação ou desativação da alimentação à resistência.

No entanto existe um problema associado a esta solução, pois não é possível posicionar o termopar em contacto direto com o vidro de encapsulamento e por conseguinte a temperatura por ele medida não reflete a temperatura real a que a *epoxy* estará sujeita. De facto este termopar está um pouco afastado do dispositivo, estando mais próximo dos filamentos da resistência, como se verifica na figura 34, e assim medirá sempre uma temperatura superior àquela que estará na *epoxy* (cerca de 10 °C). Para ultrapassar este problema realizou-se um ensaio onde foi medida a temperatura registada pelo termopar na sua posição e relacionada com a temperatura medida por um outro sensor colocado em contacto direto com o vidro do substrato e fixo a este com fita de carbono. Com este ensaio recalibrou-se a tensão medida pelo termopar para corresponder a um valor de temperatura junto à *epoxy*. A partir daqui escolheu-se um valor de tensão de referência, correspondente a uma temperatura de 60 °C na *epoxy*. Assim, enquanto o Arduino medir uma tensão inferior a esse valor de referência a resistência é ligada e quando medir um valor superior é desligada, mantendo uma temperatura aproximadamente constante de 60 °C. Esta medição é feita a cada segundo até o tempo de pré cura, definido pelo operador, terminar. No final do tempo, o estágio de aquecimento está concluído e o OLED pronto para ser removido sem perigo de descolar o encapsulamento.

6. Conclusão e trabalho futuro

Ao longo deste trabalho foi apresentada a importância da utilização dos OLEDs no nosso quotidiano, em substituição das formas de iluminação existentes. Foi explicada a geração de luz nos semicondutores orgânicos e a construção genérica de um OLED para se perceberem os mecanismos de degradação que neles ocorrem. A degradação nos OLEDs deve-se principalmente a agentes extrínsecos existentes na atmosfera, o vapor de água e o oxigénio, que são responsáveis pela formação de pontos negros não emissivos e pela deslaminção e oxidação do cátodo. A degradação extrínseca pode ser eliminada através do encapsulamento em ambiente controlado. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema automatizado de encapsulamento para proteger o OLED do ambiente atmosférico.

Foi encontrada uma solução para o encapsulamento baseada na colagem e vedação lateral de um vidro de encapsulamento por cima das várias camadas que constituem o OLED. Baseado neste método foi desenvolvido e construído um sistema eletromecânico controlado por computador e semi automatizado para permitir que a interação do operador seja mínima durante o processo de encapsulamento, condição essencial quando se trabalha numa câmara de luvas. O sistema desenvolvido permite ser controlado localmente tanto por porta USB, quando a câmara de luvas possuir conector para tal, como remotamente sem fios. Durante toda a construção do sistema foram seguidos *designs* e métodos que o tornam compatível com utilização dentro de uma câmara de luvas e que permitiram a construção deste protótipo a custos muito reduzidos, uma das condições impostas desde o início do projeto. O protótipo construído foi pensado para as necessidades de encapsulamento dos OLEDs produzidos no DFUA. No entanto, foi igualmente concebido para que a sua utilização possa ser expandida para OLEDs ou outros dispositivos que necessitem de encapsulamento rígido, como células solares orgânicas por exemplo, com outras dimensões e características.

Depois do sistema de encapsulamento estar construído (figura 35), realizaram-se diversos ensaios e testes de forma a encontrar os melhores parâmetros para um encapsulamento bem-sucedido. Destes ensaios foram retiradas algumas conclusões que permitiram o estabelecimento dos procedimentos de funcionamento necessários. Como regra de utilização, a temperaturas ambientes da ordem dos 23 °C, a resina deve ser utilizada após uma hora depois de preparada, para evitar o efeito de pingo. Para a utilização a temperaturas diferentes devem ser realizados ensaios para determinar o tempo necessário. Esse tempo deverá ser tal que o intervalo entre pingos seja superior a 15 minutos; a ponta da pipeta volumétrica que contém a *epoxy* deve ser colocada quase em contacto direto com OLED, usando a *webcam* instalada para o efeito; nas condições descritas deve ser utilizada uma velocidade de 3 mm/s com uma razão inicial entre o movimento do OLED e o movimento do êmbolo de injeção de *epoxy* de 30. Por fim, a colocação do encapsulamento de vidro é efetuada sem exercer pressão no OLED e realiza-se a pré-cura da resina a uma temperatura de 60 °C durante 15 minutos.

Quanto ao sistema de encapsulamento, podem sempre ser feitas melhorias, nomeadamente, seria interessante desenvolver um processo de encapsulamento em série totalmente automatizado. Depois do OLED estar encapsulado, mas antes do aquecimento, poderia ser retirado para um estágio de aquecimento fora da mesa XY e assim, seria possível colocar logo outro OLED a encapsular, sem ser necessário esperar todo o tempo de pré-cura, o que contribui também para o endurecimento da *epoxy* que está á espera para ser depositada.

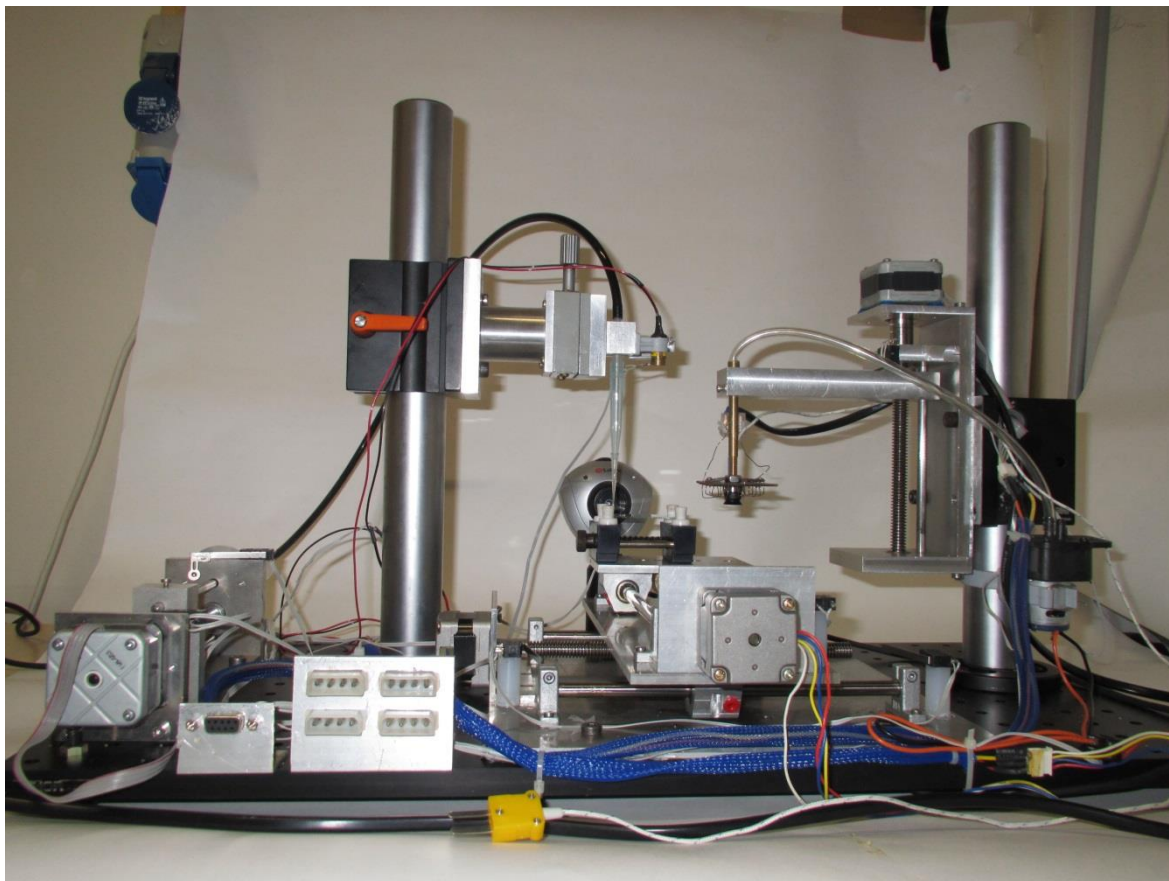


Figura 35 – Fotografia do sistema de encapsulamento de OLEDs.

Referências

1. NanoMarkets, *Positioning OLED Lighting for Success*. 2007.
2. NanoMarkets, *Markets for OLED Encapsulation Materials 2012-2019*. 2012, NanoMarkets, LC.
3. Sze, S.M. and K.K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices*. 2007: John Wiley & Sons.
4. Neamen, D.A., *Semiconductor physics and devices: basic principles*. 2003: McGraw-Hill.
5. Brutting, W., *Physics of Organic Semiconductors*. 2005, Wiley-VCH.
6. Schols, S., *Device Architecture and Materials for Organic Light-Emitting Devices*. 2011: Springer.
7. Shinar, J. and V. Savvateev, *Organic Light-emitting devices: a Survey*. 2003: Springer.
8. Posada, P.C., et al., *Fundamentos de la Tecnología OLED*. 2008: Mata Digital, SL.
9. Li, Z.R. and H. Meng, *Organic Light-emitting Materials and Devices*. 2006: Taylor & Francis.
10. Wiederrecht, G., *Handbook of Nanoscale Optics and Electronics*. 2010: Elsevier B.V.
11. Ohring, M., *Materials Science of Thin Films*. Vol. 2. 2002: Academic Press.
12. Petty, M., *Molecular electronics: from principles to practice*. 2007: Wiley.
13. Tekin, E., *Thin Film Libraries of Functional Polymers*. 2007, Technische Universiteit Eindhoven.
14. Doa, L.-M., et al., *Thermal Stabilities of Organic Layer in Electroluminescent Devices*. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 1996. **280**(1): p. 373.
15. Aziz, H., et al., *Humidity-induced crystallization of tris (8-hydroxyquinoline) aluminum layers in organic light-emitting devices*. *Appl. Phys. Lett.*, 1998. **72**: p. 756.
16. Aziz, H., et al., *Degradation Mechanism of Small Molecule-Based Organic Light-Emitting Devices*. *Science*, 1999. **283**: p. 1900.
17. Gautier, E., et al., *Electrode interface effects on indium-tin-oxide polymer/metal light emitting diodes*. *Appl. Phys. Lett.*, 1996. **69**: p. 1071.
18. Do, L.M., et al., *Observation of degradation processes of Al electrodes in organic electroluminescence devices by electroluminescence microscopy, atomic force microscopy, scanning electron microscopy, and Auger electron spectroscopy*. *J. Appl. Phys.*, 1994. **76**: p. 5118.
19. Schaer, M., et al., *Water Vapor and Oxygen Degradation Mechanisms in OLEDs*. *Advanced Functional Materials*, 2001. **11**(2): p. 116-121.
20. Khan, R.U.A., et al., *Degradation in blue-emitting conjugated polymer diodes due to loss of ohmic hole injection*. *Appl. Phys. Lett.*, 2004. **84**: p. 921.
21. Hunga, L.S. and C.H. Chenb, *Recent progress of molecular organic electroluminescent materials and devices*. *Materials Science and Engineering*, 2002. **39**(5-6): p. 143-222.
22. Zardareh, S.Z. and F.A. Boroumand, *Degradation in Organic Light Emitting Diodes*. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2009. **50**: p. 274-277.
23. Shen, J., et al., *Degradation mechanisms in organic light emitting diodes*. *Synthetic Metals*, 2000. **111-112**: p. 233-236.
24. Aziz, H., *Intrinsic degradation mechanism in tris(8-hydroxyquinolato) aluminum-based organic light emitting devices*. 1999, McMaster University.
25. Pinato, A., et al., *Impact of Trapped Charge and Interface Defects on the Degradation of the Optical and Electrical Characteristics in NPD/Alq3 OLEDs*. *IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES*, 2010. **57**(1): p. 178-187.

26. NanoMarkets, *An Update on OLED Encapsulation*. 2012, NanoMarkets, SL.
27. Park, J.-S., et al., *Thin film encapsulation for flexible AM-OLED: a review*. SEMICONDUCTOR SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2011. **26**.
28. Corporation, C.T. *Equipment for Mass Production*. [cited 2013 19-10]; Available from: <http://www.canon-tokki.co.jp/eng/product/el/mass.html>.
29. Schwartz, E., *Roll to Roll Processing for Flexible Electronics* 2006, Cornell University.
30. Visser, R.J., *Barix Multilayers: a Water and Oxygen Barrier for Flexible Organic Electronics*. 2005: MIT·Stanford·UC Berkeley Nano Forum.
31. Morse, J.D., *Nanofabrication Technologies for Roll-to-Roll Processing*. 2011, National Nanomanufacturing Network.
32. Bhatnagar, M.S., *EPOXY RESINS (Overview)*, in *The Polymeric Materials Encyclopedia*. 1996, CRC Press, Inc.
33. Singla, M. and V. Chawla, *Mechanical Properties of Epoxy Resin – Fly Ash Composite*. Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, 2010. **9**: p. 199-210.
34. EPOXY Technology, I., *EPO-TEK® 302-3M*, in *Technical Data Sheet For Reference Only Optically Transparent Epoxy*. 2010.
35. EPOXY Technology, I., *EPO-TEK® Low Outgassing Adhesives*, in *NASA ASTM E595*. 2012.
36. Karvinen, K. and T. Karvinen, *Make: Arduino Bots and Gadgets*. 2011: O'Reilly Media, Inc.
37. Banzi, M., *Getting Started with Arduino*. 2009, O'Reilly Media.
38. Allegro MicroSystems, L., *Microstepping Driver with Translator*, in *A3967 datasheet*. 2002.
39. Allegro MicroSystems, L., *DMOS Microstepping Driver with Translator*, in *A4983 datasheet*. 2007.
40. Schmalz, B. *EasyDriver Stepper Motor Driver*. [cited 2013 26/10]; Available from: <http://www.schmalzhaus.com/EasyDriver/>.
41. Alciatore, D.G. and M.B. Hstand, *Introduction to Mechatronics and Measurement Systems*. 2012: McGraw-Hill.
42. OMEGA. *Thermocouple Introduction and theory*. 2013; Available from: www.omega.com.
43. Wilson, J.S., et al., *Test and Measurement: Know It All*. 2008: Newnes.
44. Acarnley, P., *Stepping Motors: A Guide to Theory and Practice*. Vol. 4. 2002: The Institution of Engineering and Technology.
45. solarbotics.net. *Stepper Motor Basics*. Available from: <http://www.solarbotics.net/library/pdflib/pdf/motorbas.pdf>.

